



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

**INSPEKCE EMBOSOVANÉHO TEXTU A VZORŮ NA
TUBÁCH S VYUŽITÍM STROJOVÉHO VIDĚNÍ**

MACHINE VISION-BASED INSPECTION OF EMBOSSED TEXTS AND PATTERNS ON TUBES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Patrik Záhorský

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Škrabánek, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automatizace a informatiky
Student: **Patrik Záhorský**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Aplikovaná informatika a řízení
Vedoucí práce: **Ing. Pavel Škrabánek, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Inspekce embosovaného textu a vzorů na tubách s využitím strojového vidění

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Řada produktů potravinářského, farmaceutického a chemického průmyslu je plněna do plastových či laminátových tub. Po naplnění jsou tuby uzavřeny pomocí svařovacích lišt, které jsou často vybaveny výměnnými vzory a znaky pro značení data a kódu. Přesnost jejich vyražení však není vždy stoprocentní a je nutné ji kontrolovat. V praxi se osvědčila vizuální kontrola, kterou lze realizovat jak s využitím lidské práce, tak i s využitím prostředků strojového vidění.

Cíle bakalářské práce:

Student navrhne, realizuje a otestuje systém pro kontrolu kvality embosovaného textu a vzorů na tubách. Systém bude využívat techniky strojového vidění.

Seznam doporučené literatury:

HORNBERG, Alexander, ed. Handbook of Machine and Computer Vision: The Guide for Developers and Users. 2. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag, 2017. ISBN 978-3-527-41339-3.

GONZALEZ, Rafael C., Richard E. WOODS a Steven L. EDDINS. Digital Image Processing Using MATLAB. 3. Gatesmark Publishing, 2020. ISBN 9780982085417.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalárska práca sa zaoberá inšpekciou embosovaného textu a vzorov na plastových tubách s využitím strojového videnia. Súčasťou práce je rešeršná časť, ktorá sa zaoberá zložením systémov strojového videnia a jeho úlohami v priemysle, spôsobom vzniku digitálneho obrazu, vlastnosťami, technológiou a použitím jednotlivých súčastí systému, vrátane popisu technických a programových prostriedkov pre spracovanie dát. Následne sú vyšpecifikované riešené úlohy a popísané sledované objekty. Návrh systému pozostáva z popisu hardvérových súčastí, ich vzájomnému prepojeniu, voľby vhodnej geometrie a realizácie do kompletnej zostavy. Nasleduje návrh riešení pre špecifikované úlohy, ktorý popisuje voľbu jednotlivých algoritmov a nastavenia ich parametrov. Na záver je zrealizované riešenie otestované na dvoch rozličných sadách vzoriek a výsledky sú príslušne vyhodnotené.

ABSTRACT

Bachelor thesis deals with the inspection of embossed text and patterns on plastic tubes using machine vision. Part of the work is a research part, which deals with the composition of machine vision systems and its tasks in industry, the method of digital imaging, properties, technology and use of individual system components, including a description of technical and software tools for data processing. Subsequently, the solved tasks are specified and the monitored objects are described. The design of the system consists of a description of the hardware components, their interconnection, selection of a suitable geometry and implementation into a complete assembly. The following is a proposal for solutions for specified tasks, which describes the selection of individual algorithms and the setting of their parameters. Finally, the implemented solution is tested on two different sets of samples and the results are accordingly evaluated.

KEÚČOVÉ SLOVÁ

Strojové videnie, kontrola kvality, automatizovaná inšpekcia, plastová tuba, embosovaný text, embosované vzory

KEYWORDS

Machine vision, quality control, automated inspection, plastic tubes, embossed text, embossed patterns

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

ZÁHORSKÝ, Patrik. *Inspekce embosovaného textu a vzorů na tubách s využitím strojového vidění*. Brno, 2021. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval svojmu vedúcemu Ing. Pavlovi Škrabánkovi, Ph.D. za vecné pripomienky, usmernenie a dobrú komunikáciu počas tvorby práce. Ďalej ďakujem svojej rodine za podporu počas celého štúdia a špeciálne poďakovanie patrí mojej priateľke Valentyne za prínosné rady a trpezlivosť.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením Ing. Pavla Škrabánka, Ph.D. a s použitím literatúry uvedenej v zozname literatúry.

V Brně dne 22. 5. 2021

.....

Patrik Záhorský

OBSAH

ÚVOD.....	15
1 POPIS SYSTÉMOV STROJOVÉHO VIDENIA	17
1.1 Zloženie systému	17
1.2 Typy úloh strojového videnia	18
2 VZNIK DIGITÁLNEHO OBRAZU	20
2.1 Fotoelektrický jav	20
2.2 Prevod obrazu do digitálnej podoby	21
2.3 Bayerova maska.....	24
3 SENZORY PRE SNÍMANIE DIGITÁLNEHO OBRAZU	26
3.1 Technológia optických snímačov	26
3.2 Uzávierka.....	29
3.3 Elektrické obvody.....	30
3.4 Optická sústava.....	31
3.5 Typy kamier.....	31
4 OBJEKTÍVY A ICH VLASTNOSTI.....	33
4.1 Základné zákony geometrickej optiky.....	33
4.2 Druhy šošoviek a vlastnosti objektívov	34
4.3 Druhy objektívov	36
4.4 Vady a skreslenie objektívov.....	37
5 VLASTNOSTI A POUŽITIE OSVETĽOVAČOV	39
5.1 Vlastnosti svetla dopadajúceho na objekt.....	39
5.2 Svetelné zdroje	40
5.3 Geometria osvetlenia	41
5.4 Typy osvetľovačov	42
5.5 Riadenie osvetľovačov a rušivé vplyvy.....	44
6 PROSTRIEDKY PRE SPRACOVANIE OBRAZU.....	45
6.1 Spracovanie dát z hľadiska realizácie.....	45
6.2 Zbernice	45
6.3 Nástroje pre spracovanie obrazu.....	47
7 PROGRAMOVÉ PROSTRIEDKY PRE SPRACOVANIE OBRAZU	48
7.1 Predspracovanie dát.....	48
7.2 Segmentácia obrazu	49

7.3	Algoritmy k popisu objektov a interpretácií výsledkov	49
8	NÁVRH A REALIZÁCIA SYSTÉMU	51
8.1	Špecifikácia úlohy	51
8.2	Skúmané predmety a hľadané parametre	51
8.3	Hardvérové súčasti a príslušenstvo	53
8.4	Komunikácia kamery a užívateľské rozhranie	56
8.5	Kontrola dátumu spotreby	57
8.6	Kontrola uzáveru	61
9	OTESTOVANIE SYSTÉMU	64
9.1	Rozpoznávanie znakov	64
9.2	Kontrola uzáveru	67
	ZÁVER	69
	ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	70
	ZOZNAM OBRÁZKOV A TABULIEK	73
	Zoznam obrázkov	73
	Zoznam tabuliek	74
	ZOZNAM PRÍLOH	75

ÚVOD

Pojem strojové videnie predstavuje súbor technológií a metód zaoberajúcich sa získavaním, spracovaním, analýzou a vyhodnocovaním obrazových dát automatizovanou formou. Samotný termín strojového videnia vznikol aplikáciou počítačového videnia v priemyselnej praxi. Počítačové videnie možno charakterizovať ako pomerne nový technický smer, ktorého história siaha do 70. rokov minulého storočia. Významným míľnikom bolo rozšírenie integrovaných obvodov, ktoré so sebou prinieslo možnosť spracovávať veľké objemy dát nesúce obrazové informácie. Dôležitý posun v oblasti počítačového videnia, tak ako ho poznáme v súčasnosti, nastal v roku 1969 vynálezom technológie CCD¹, ktorá je používaná dodnes.

Počítačové systémy spracovania obrazu sa síce objavujú už v 70. rokoch minulého storočia, ale najvyšší dopyt nastal na prelome milénia. Mnoho výrobných spoločností sa zmenou marketingových stratégií zameralo na maximálne uspokojenie potrieb svojich zákazníkov, primárne v oblasti kvality výroby, čo malo za následok väčšiu mieru automatizácie procesov a zvýšenie nárokov na systémy počítačového a strojového videnia [1]. Kamerové systémy sú vhodné pre repetitívne inšpekčné úlohy a v širokom spektre aplikácií sú alternatívou k ľudskej pracovnej sile. V porovnaní s inšpekčnými pracovníkmi ponúkajú objektívnejšie a rýchlejšie výsledky, a taktiež môžu pracovať nepretržite. Výrobcom použitie takého systému prináša zníženie chybovosti a nákladov na pracovníkov, čo vedie k zvýšeniu zisku. Vývoj v oblasti kamerových systémov viedol k rozvoju nových technických smerov. Jedným z nich je napríklad oblasť zaoberajúca sa osvetľovaním objektov.

Vo všeobecnosti je trend využitia systémov strojového videnia na európskom a severoamerickom trhu rastúci, s výnimkou obdobia finančnej krízy v rokoch 2008-2012. Po odznení krízy sa dopyt opäť zvýšil a v roku 2015 zaznamenal historické maximum. Momentálne má stále rastúci charakter [2].

Cieľom bakalárskej práce je oboznámenie čitateľa s problematikou strojového videnia a následný návrh takéhoto systému. Rešeršná časť bakalárskej práce bude venovaná hardvérovým prvkom a softvérovým nástrojom užívaných v priemyselnej praxi. Praktická časť práce sa bude zaoberať návrhom a realizáciou systému strojového videnia, určeného ku kontrole embosovaných vzorov a znakov.

¹ CCD (Charged-Coupled Device) - technológia využívajúca digitálny senzor.

1 POPIS SYSTÉMOV STROJOVÉHO VIDENIA

V úvodnej kapitole bol spomenutý pojem počítačové videnie. Pod ním si možno predstaviť používanie jednej, alebo viacerých kamier, za účelom kontroly a analýzy objektov automatizovaným spôsobom. Kamera môže kontrolovať pozíciu objektu, jeho tvar, farbu, veľkosť alebo čiarové kódy a vyrazené znaky. Po vyhodnotení kontrolovaných parametrov je zvyčajne generovaný signál, ktorý je predaný nadradenému riadiacemu systému. Ten, na základe získaných údajov z kamery a charakteru procesu vyhodnotí, čo sa bude s produktom diať ďalej.

1.1 Zloženie systému

Kamera je nutným predpokladom k zisku obrazu, ale nemožno ju považovať za samotný systém strojového videnia. Kompletné systémové riešenie pozostáva z nasledujúcich prvkov [2]:

- **digitálna kamera** je zariadenie tvorené množinou prostriedkov potrebných k zaznamenaní obrazovej informácie a jej spracovaniu do digitálnej podoby. Každá kamera obsahuje optický snímač, prostredníctvom ktorého je získavaný obraz scény a elektronické obvody. Tie zabezpečujú základné spracovanie dát, komunikáciu s ostatnými zariadeniami a obsluhu snímača. Všetky prostriedky sú umiestnené v puzdre, ktoré je zväčša opatrené rozhraním pre pripojenie objektívu, a taktiež obsahuje potrebné mechanické súčasti, ako napríklad uzávierku.
- **osvetľovače** slúžia ako zdroj svetla pre optimálne nasvetlenie sledovaného objektu. Ich účelom je vytvorenie požadovanej hodnoty kontrastu v záujmovej zóne, a naopak minimalizácia kontrastu pre zvyšok scény. Osvetľovače taktiež slúžia k zabezpečeniu homogénnych podmienok okolitého prostredia, čo má výrazný podiel na stabilite vyhodnocovania výsledkov merania.
- **objektívy** používané v oblasti strojového videnia sú tvorené sústavou šošoviek umiestnených v puzdre, prostredníctvom ktorej je na obrazovom snímači vytvorený geometricky zmenený obraz.
- **prostriedky k spracovaniu dát** zahrňujú dostatočne výkonnú výpočtovú techniku, pomocou ktorej sú nasnímané informácie spracovávané. Z hľadiska realizácie je možné dáta spracovávať priamo v zariadení, čo je doménou inteligentných kamier². Toto riešenie je vhodné v aplikáciách, kde je postačujúci obmedzený výpočtový výkon, a zároveň je potrebné zachovať malé konštrukčné rozmery kamery. Ďalšou z možností je použitie klasického PC, ktorý disponuje

² Inteligentná kamera - spracovanie obrazu prebieha bez nutnosti pripojeného PC.

vysokým výpočtovým výkonom, ale z dôvodu nízkej odolnosti voči vibráciám a prachu nie je jeho použitie vhodné v priemyselnom prostredí. Vysoký výkon a zároveň odolnosť voči prostrediu kombinuje systém pre spracovanie obrazu. Pri obstaraní tohto riešenia je potrebné počítať s vysokými vstupnými nákladmi [1].

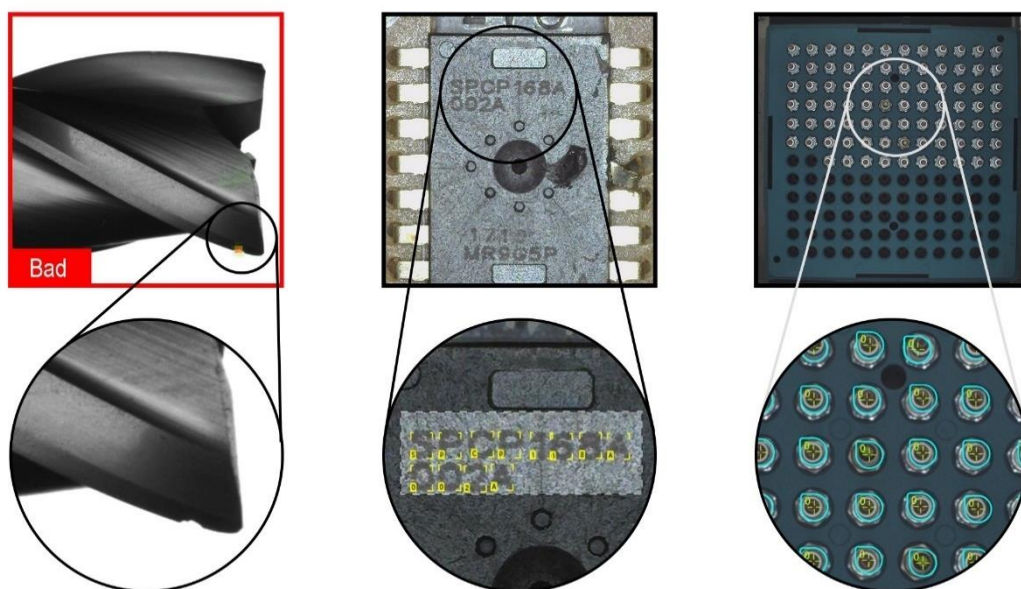
- **prostriedky k vyhodnocovaniu dát** zahrňujú programové operácie pre prácu s obrazovými dátami za účelom získania požadovanej informácie. Ako prvé sú dáta zväčša predspracované a v tomto kroku prebiehajú napríklad geometrické transformácie alebo potlačenie šumu. Následne je možné obraz rozdeliť do oblastí so spoločnými vlastnosťami, tento proces sa nazýva segmentácia obrazu. Pri spracovaní obrazových dát je zväčša potrebné vyjadriť kvalitatívnu alebo kvantitatívnu mieru sledovaných parametrov. Pomocou programových prostriedkov je následne možné objekty popísať a správne porozumieť obsahu obrazu.

1.2 Typy úloh strojového videnia

Predošlý text poskytuje základnú predstavu o hardvérovom a softvérovom vybavení systému strojového videnia. Voľba jednotlivých prvkov je závislá na konkrétnej aplikácii a charaktere sledovaných parametrov. Časť kamerových systémov v priemyselnom prostredí je zameraná na špeciálne úlohy. V tomto prípade je potrebné k riešenému problému pristupovať vždy individuálne. Napriek tomu je možné identifikovať niekoľko opakujúcich sa typov úloh a rozdeliť ich nasledovne [3]:

- **rozpoznávanie kódov** slúži k identifikácii vytlačených alebo vyrazených značiek a vzorov u záujmových objektov. Najčastejšie sa používajú štandardizované čiarové kódy, alebo razené dátumy. Typickou aplikáciou je sledovanie toku materiálu v logistike.
- **rozpoznávanie objektov** sa vyznačuje sledovaním charakteristických vlastností u predmetov záujmu. Sú to napríklad geometria objektu, rozmery, tvar, farba alebo štruktúra povrchu.
- **rozpoznávanie polohy** sa používa všade, kde je potrebné určiť polohu alebo orientáciu objektu v predefinovanom súradnicovom systéme. Typickou aplikáciou je navádzanie robotov.
- **kontrola úplnosti** zoskupuje úlohy, pri ktorých je potrebné kontrolovať úplnosť balenia, alebo napríklad správne zmontovanie výrobkov vo výslednej zostave.
- **kontrola tvaru a rozmerov** zahŕňa úlohy, v ktorých sú vyhodnocované geometrické veličiny s vysokou presnosťou, čo má za následok zvýšené požiadavky na výpočtový výkon systému. Typickou aplikáciou je kontrola tolerancií u obrobkov.

- **povrchová kontrola** pokrýva úlohy zamerané na určenie topografických vlastností povrchu u sledovaného objektu. Typickými aplikáciami sú kontrola drsnosti, povrchových nedostatkov ako napríklad škrabance, preliačiny, znečistenie alebo farba a textúra povrchu. Tento druh úloh je ozajstnou výzvou v odbore strojového videnia a vyznačuje sa použitím výpočtovo náročných algoritmov.



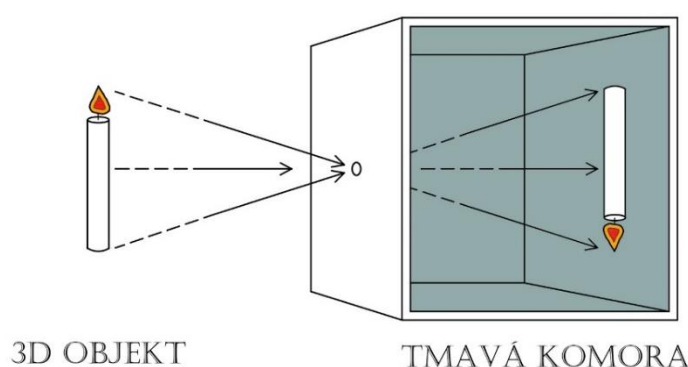
Obr. 1: Príklady úloh strojového videnia [4]

Názorný príklad niektorých typov úloh strojového videnia poskytuje obrázok 1, pričom v ľavej časti obrázku je zobrazená kontrola tvaru a sledovaným parametrom je hrana objektu. Nasledujúcim príkladom je rozpoznávanie kódu, vytlačeného na telese integrovaného obvodu, pričom detekcia prebieha pomocou algoritmu OCR³. Tretím prípadom, zobrazeným v pravej časti obrázku, je detekcia prítomnosti matíc v prípravku, čo vo vyššie uvedenom rozdelení zodpovedá kontrole úplnosti.

³ OCR (Optical Character Recognition) – optické rozpoznávanie vytlačeného alebo vyrazeného textu a prevod do digitálnej podoby.

2 VZNIK DIGITÁLNEHO OBRAZU

Obrazová informácia vzniká projekciou sledovaného trojrozmerného objektu na svetlocitlivú plochu. Tá je spravidla umiestnená v svetlotesnej uzavretej komore s malým otvorom alebo sústavou optických šošoviek. Optickou sústavou do uzavretej komory vniká svetelná energia vytvárajúca obrazový záznam na svetlocitlivej ploche. Najjednoduchším príkladom je dierková komora na obrázku 2. Tento princíp využívajú taktiež fotoaparáty. U klasického fotoaparátu je obraz zaznamenávaný na film s vrstvou svetlocitlivých chemikálií.



Obr. 2: Dierková komora nazývaná tiež Camera obscura

2.1 Fotoelektrický jav

U digitálneho fotoaparátu alebo kamery slúži na zaznamenanie obrazu optický snímač. Skladá sa zo svetlocitlivých buniek - pixelov⁴, ktoré spoločne tvoria maticu o veľkosti $k \times l$ prvkov, kde k predstavuje počet riadkov a l odpovedá počtu stĺpcov matice. Obrazový snímač využíva rovnako, ako ostatné elektronické svetlocitlivé súčiastky, fyzikálny jav známy ako fotoelektrický efekt. Tento dej spočíva v tom, že svetelná častica (fotón) pri náraze do atómu polovodiča dokáže previesť niektorý z jeho elektrónov do excitovaného stavu. Jedná sa o stav, v ktorom sú elektróny z elektrónového obalu prenesené do vyšších hladín ako je ich normálny stav, z čoho vyplýva, že nadobudnú väčší energetický obsah. Energia, ktorú pritom predá fotón atómu odpovedá vzťahu:

$$E = hf, \quad (1)$$

⁴ Pixel - elementárny obrazový prvok a najmenšia jednotka digitálnej grafiky.

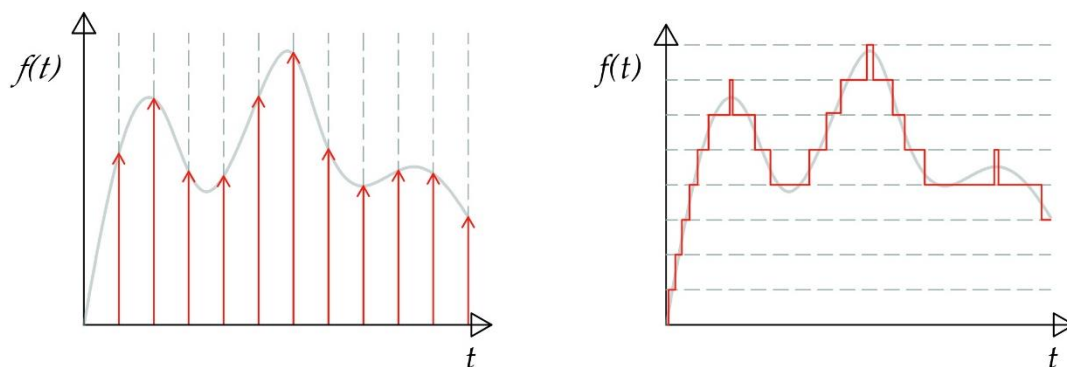
kde f je frekvencia fotónu, a h odpovedá Planckovej konštante. Elektróny, ktoré sa uvoľňujú prostredníctvom fotoefektu, musia najprv prekonať sily, ktoré ich držia v látke. Určitá časť energie je teda spotrebovaná k uvoľneniu elektrónu z materiálu a zvyšný energetický zostatok sa premení na kinetickú energiu vyletujúceho elektrónu. Na základe zákona zachovania energie platí:

$$hf = U_o + U_k = U_o + \frac{1}{2}mv^2, \quad (2)$$

kde U_o je energia potrebná k uvoľneniu elektrónu z látky, U_k je kinetická energia vyletujúceho elektrónu, m odpovedá hmotnosti elektrónu a v jeho rýchlosti. Fotoelektrický dej sa ďalej delí na vnútorný a vonkajší. Kamerové snímače, a vo všeobecnosti optoelektronické senzory, spadajú do kategórie, kde je využívaný vnútorný fotoelektrický jav. Dôsledkom nárastu energetického obsahu u elektrónov sa dostávajú z valenčného do vodivostného pásma. To má za následok zvýšenú koncentráciu nosičov náboja, a v konečnom dôsledku zmenu vodivosti polovodiča. Fotoefekt objasnil v roku 1905 Albert Einstein, za čo mu bola udelená Nobelova cena za fyziku. Zaujímavosťou je, že bol ocenený za objasnenie fotoelektrického javu a nie za objav teórie relativity, ktorou sa preslávil [3].

2.2 Prevod obrazu do digitálnej podoby

Keďže proces získavania obrazu prebieha analógovo a vyhodnotenie obrazových informácií naopak číslicovo, je potrebné informácie previesť zo spojitých do diskretných podoby. To sa dosiahne použitím A/D prevodníka. Jeho funkcia pozostáva z dvoch krokov, ktorými sú vzorkovanie a kvantovanie.



Obr. 3: Grafické znázornenie hodnoty signálu $f(t)$ v závislosti na čase t . V ľavej časti obrázku je proces vzorkovania a v pravej - kvantovanie spojitého signálu.

Ako vidieť na obrázku 3, vzorkovaním je spojitý signál rozdelený na niekoľko časových úrovní a takýto signál už nie je spojitý v čase. Pri kvantovaní dochádza k obmedzeniu počtu úrovní, ktoré môže spojitý signál nadobudnúť, čoho následkom je, že zmeny v kvantovanom signáli prebiehajú skokovo. Kvantovaním signálu navyše dochádza k nenávratnej strate časti informácie. Z predošlých poznatkov vyplýva, že A/D prevodník má významný vplyv na počet jasových úrovní, ktoré môže svetlocitlivá bunka nadobudnúť [2].

$$2^n = j, \quad (3)$$

kde n odpovedá počtu bitov prevodníku a j je počet jasových úrovní svetlocitlivej bunky.

V prípade, že je zvolený napríklad 8-bitový prevodník, každá bunka môže nadobudnúť 2^8 hodnôt, čo odpovedá 256 rôznym úrovniam jasu. Hodnota 0 odpovedá čiernej farbe, alebo stavu bez svetla. Naopak, ak by bunka nadobudla maximálnu hodnotu 255, odpovedalo by to bielej farbe a stavu s maximálnou intenzitou svetla. Ak by svetlocitlivý prvok nadobudol hodnotu napríklad 64, odpovedalo by to zhruba 25% maximálnej hodnoty 255, čo predstavuje tmavo šedú farbu. Obdobným prípadom je napríklad hodnota 192, ktorá odpovedá približne 75% maximálnej hodnoty nasvetlenia, a teda svetlo šedej farbe.

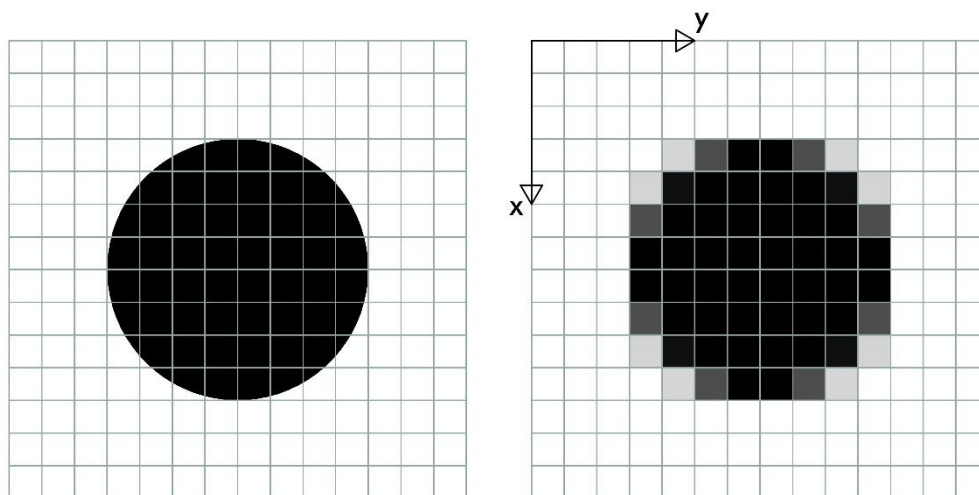


Obr. 4: Stupnica sivej, na obrázku vľavo v spojitý podobe. Vpravo diskretná stupnica sivej, s použitím 3-bitového prevodníku.

Farebný rozsah, ktorý môže svetlocitlivý prvok v prípade čierneho bieleho obrazu nadobudnúť, sa nazýva stupnica sivej a je znázornená na obrázku 4. V niektorých prípadoch môže byť počet jasových úrovní, ktoré ponúka 8-bitový prevodník nepostačujúci. V takejto situácii možno zvoliť 10, 12 alebo až 16-bitový variant.

V priemyselnej praxi sa k vytvoreniu snímku nepoužívajú tisíce drobných fotoelektrických snímačov. Namiesto toho optická sústava sústreďuje obraz na

polovodičovou maticu svetelných detektorov. V takejto matici sa používa pole svetlocitlivých polovodičových prvkov typu CCD alebo CMOS⁵ [5].



Obr. 5: Projekcia scény na snímač v spojitej a diskretnej podobe

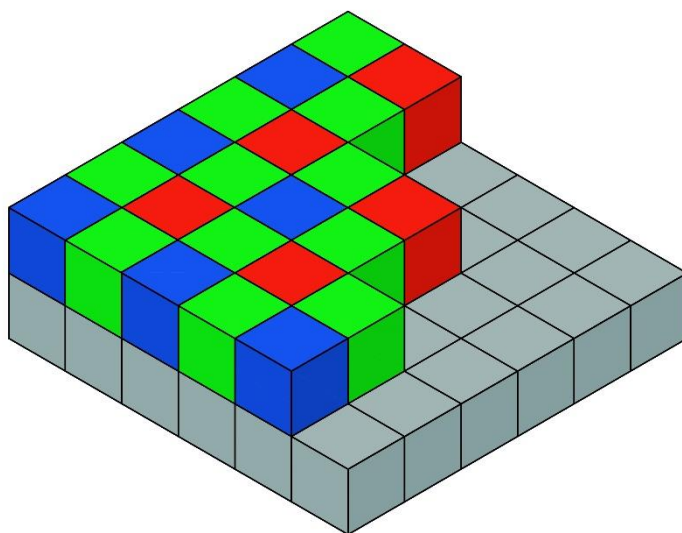
Na to, aby bolo možné získaný obraz ďalej spracovávať, je potrebné zaviesť súradnicový systém. Na základe konvencie sa nulový bod nachádza v ľavom hornom rohu, ako vidieť na obrázku 5. Súradnicové osi sú otočené o 90° v smere hodinových ručičiek. V ľavej časti obrázku je znázornená projekcia scény na kamerový snímač v skutočnosti, teda v spojitej podobe. Vpravo je vidieť identický snímok, u ktorého prebehol proces vzorkovania a kvantovania. Samotný obraz je funkciou intenzity dopadajúceho svetla $f(x,y)$, kde f predstavuje jasovú úroveň bodu (x,y) a súradnice x a y sú priestorovými súradnicami obrazového prvku. Digitalizovaný obrázok má tri základné vlastnosti:

- **rozlíšenie.** Obrázok sa skladá z k bodov na horizontálnej osi a l bodov na osi vertikálnej. Z toho vyplýva, že rozlíšenie odpovedá hodnote $k \times l$ bodov.
- **bitová hĺbka** predstavuje počet jasových úrovní, ktoré môže daný pixel nadobudnúť.
- **počet úrovní** pri obrázku vo farbách stupnice sivej odpovedá iba jednej úrovni. Naopak, na to, aby bolo možné zachytiť farby skutočného sveta sú potrebné tri úrovne. Konkrétne rovina reprezentujúca červenú, modrú a zelenú farbu [2].

⁵ CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) - technológia využívajúca digitálny senzor.

2.3 Bayerova maska

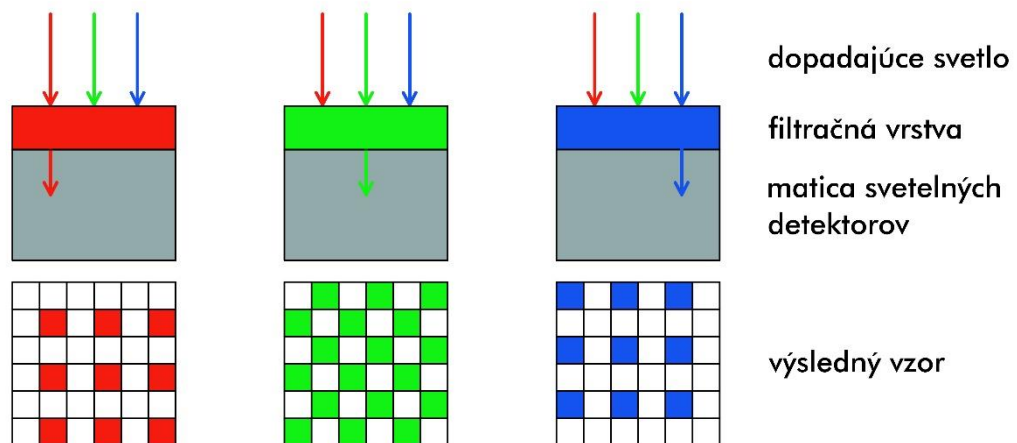
V niektorých aplikáciách, obzvlášť tam, kde je potrebné vyhodnocovať skutočné farby, nemusí byť použitie monochromatického obrazu postačujúce. V tejto situácii je potrebné obohatiť obraz o tri základné farebné zložky, takzvané RGB⁶ zložky. Jedným z riešení je použitie troch kamerových snímačov, pričom každý z nich by prijímal iba svetlo s vlnovou dĺžkou danej farby. Týmto spôsobom je možné doceliť korektný výsledok, avšak za cenu zvýšených nákladov a potenciálnych problémov so synchronizáciou snímačov. Z hľadiska nákladov je optimálnejším riešením použitie Bayerovej masky. Na maticu svetelných detektorov sa aplikuje mozaika farebných filtrov, podľa vzoru na obrázku 6, pričom každá bunka reprezentuje 1 pixel. Umiestnenie jednotlivých farebných filtrov je v pomere 25% červený, 25% modrý a 50% podiel zeleného filtra. Ten tvorí polovicu z celkového množstva pixelov na maske. Je to z dôvodu, že ľudské oko získava väčšinu svojich informácií o ostrosti práve zo zeleného svetla.



Obr. 6: Bayerova maska

Každý z filtrov umiestnených na svetlocitlivé bunky, prepúšťa iba určitú časť svetelného spektra. Na obrázku 7 je vidieť prierez jednotlivých buniek s filtračnou vrstvou a výsledné vzory na matici svetelných detektorov.

⁶ RGB (Red - Green - Blue) - farebný model miešania farieb.



Obr. 7: Prierez kamerovým snímačom s použitím Bayerovej masky

Po zachytení obrazu a prevedení do digitálnej podoby je potrebné vykonať farebnú interpoláciu. Úlohu vykonáva dekódovací algoritmus, ktorý určí RGB hodnotu každého pixelu v matici priemerovaním farebných hodnôt susedných pixelov a poskytuje odhad ich farby a intenzity. Optické vlastnosti Bayerovho filtra môžu viesť k nesúlade intenzity medzi jednotlivými zložkami RGB. Preto po dokončení procesu interpolácie prebieha ešte proces vyváženia bielej farby. Slúži na úpravu zložiek získaných použitím červeného a modrého filtra tak, aby sa zhodoval so zelenou zložkou v bielych častiach obrázka [2].

3 SENZORY PRE SNÍMANIE DIGITÁLNEHO OBRAZU

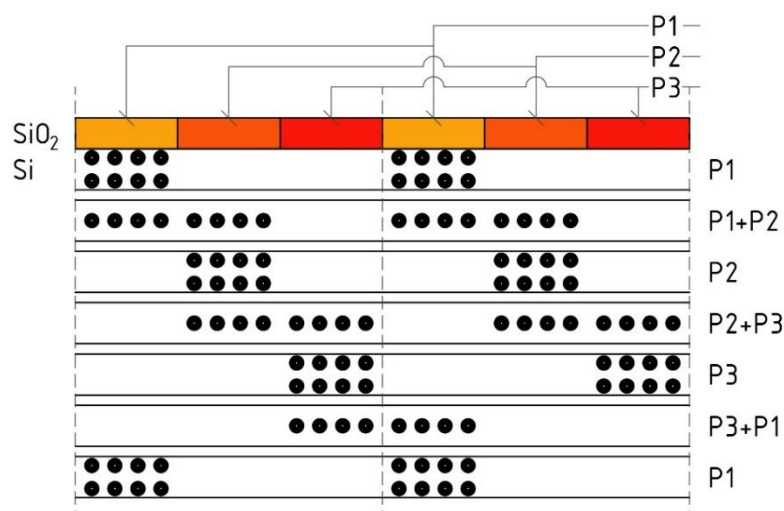
Digitálny obraz vzniká prostredníctvom obrazového snímača, ktorý je umiestnený v puzdre kamery. Ide o zariadenie pokrývajúce všetky periférie potrebné k nasnímaniu obrazu a jeho prevodu do požadovanej formy. Obrazová informácia môže byť v závislosti na zvolenom rozhraní predávaná prostredníctvom analógového alebo digitálneho signálu. Kamera sa skladá z nasledujúcich súčastí:

- obrazový snímač,
- elektrické obvody,
- optická sústava,
- puzdro.

3.1 Technológia optických snímačov

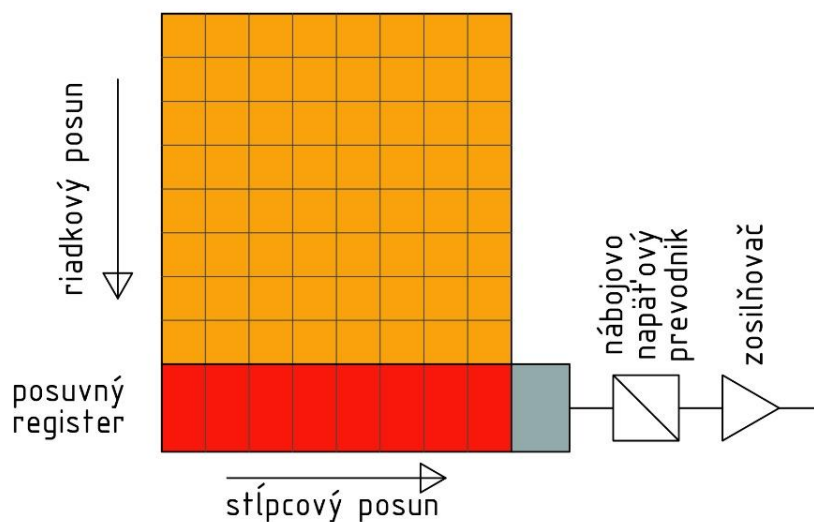
V predošlom texte bolo spomenuté, že u obrazových snímačov používaných pre strojové videnie sa používajú technológie CCD a CMOS. Obe technológie využívajú fotoelektrický jav k zachyteniu obrazu. Rozdiel je v spôsobe, akým je nadobudnutý náboj získaný a ďalej spracovávaný.

CCD snímač tvorí matica svetelných detektorov. Jej tvar môže mať dve podoby v závislosti na tom, či je snímač použitý v plošnej alebo riadkovej kamere. Každý z prvkov matice reprezentuje jeden pixel, na ktorom vzniká pôsobením svetelného žiarenia a temného šumu náboj. Temný šum sa vytvára v kremíkovej mriežke snímača vplyvom tepla a predstavuje nežiadúci šum. V ideálnom prípade by mal byť temný šum potlačený na úroveň, kedy je jeho príspevok zanedbateľný. To je možné doceliť ochladením snímača [7].



Obr. 8: Pohyb náboja v CCD snímači

Náboj na jednotlivých pixeloch je prenášaný pomocou sústavy elektród. Na tie sú privedené navzájom posunuté synchronizačné signály. Bežne používané sú varianty s dvomi, tromi, alebo štyrmi elektródami. Na obrázku 8 sú zobrazené dva pixely oddelené čiarkovanou čiarou a na každý pixel pripadajú tri elektródy. Na elektródu P1 je privedené kladné napätie a na snímač sa nechá pôsobiť svetelné žiarenie. To je dosiahnuté otvorením uzávierky na kamere. Fotóny dopadajúce na snímač excitujú v polovodiči elektróny, ktoré sú priťahované ku kladne nabitým elektródam. Po elektrónoch zostanú v polovodiči diery, vykazujúce kladný náboj, a sú priťahované elektródou zo spodnej strany snímača. Následne sa po zavretí uzávierky privedú na elektródy synchronizačné impulzy. Na elektróde P2 sa začne plynule zvyšovať napätie, pričom na P1 sa napätie znižuje. Vďaka tomu sa elektróny posunú pod elektródu P2 a celý proces sa znova opakuje [8].



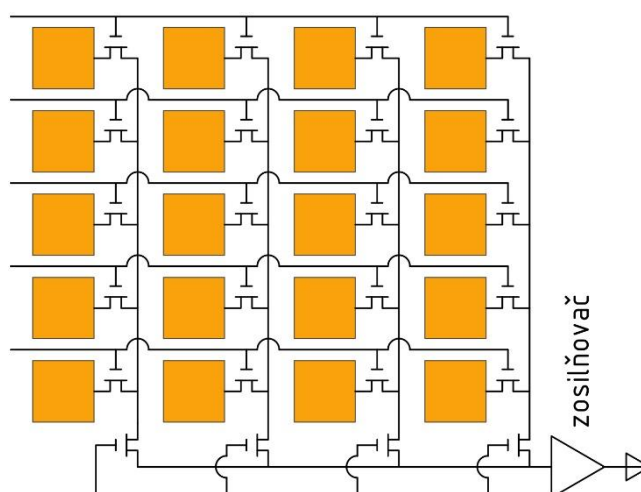
Obr. 9: Schéma činnosti CCD snímača

CCD senzor je vlastne posuvný register vystavený pôsobeniu svetelného žiarenia. Pre vysvetlenie, posuvný register spadá do skupiny klopných obvodov. Vstupy a výstupy takéhoto obvodu sú prepojené tak, že s nábežnou hranou hodinového signálu sú bity synchronne posunuté o jeden klopný obvod.

Použitie tohto princípu poskytuje schéma snímača, na obrázku 9. Oranžovo vyznačená oblasť predstavuje maticu pixelov s veľkosťou 8×8 obrazových bodov. Riadok pixelov je najprv presunutý do oblasti posuvného registra, vyznačenej červenou farbou. Následne sú náboje jednotlivých pixelov v danom riadku jeden po druhom prevedené pomocou prevodníka na napätie a zosilnené. Tento proces sa opakuje dovtedy, kým nie sú spracované všetky body matice.

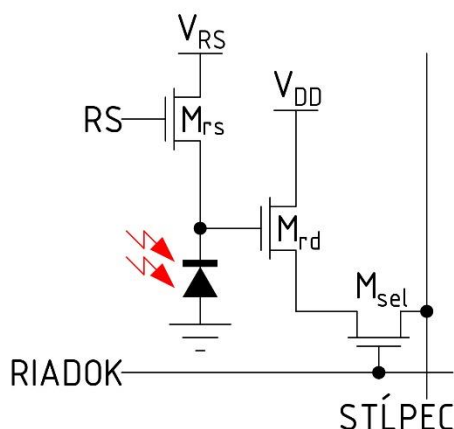
Druhým bežne používaným riešením kamerových systémov v strojovom videní sú obrazové snímače typu CMOS. Základný svetlocitlivý prvok je realizovaný pomocou fotodiódy, a ako spínacie prvky sú použité tranzistory MOSFET. Ide o unipolárne tranzistory, čo znamená, že prenos náboja je realizovaný pomocou majoritných nosičov náboja, a naopak minoritné nosiče majú parazitný charakter. Obrazové snímače CMOS sú dostupné v dvoch základných prevedeniach:

- **pasívne.** Princíp ich funkcie je zobrazený na obrázku 10, pričom žlté štvorce reprezentujú jednotlivé fotodiódy v matici. Každému svetlocitlivému prvku je pridelený spínač v podobe tranzistora, a zároveň na každom stĺpci pixelov je znova spínač. Ako prvé sú zopnuté spínače na riadku. Následne sú sekvenčne spínané tranzistory na stĺpcoch schémy a signál je zosilnený. Tento proces sa opakuje až kým nie sú spracované všetky informácie. V súčasnosti sa toto riešenie už veľmi nepoužíva a je možné sa s ním stretnúť v aplikáciách, kde nie sú vysoké nároky na kvalitu obrazu a rýchlosť snímania obrazu. Nedostatkom je taktiež vysoký šum a vysoké výrobné náklady [7].



Obr. 10: Schéma pasívneho CMOS snímača

- **aktívne** snímače CMOS, sú v porovnaní s pasívnym prevedením, obohatené o ďalšie spínacie tranzistory na každom svetlocitlivom prvku. Funkciu aktívneho snímača a zapojenie jednotlivých prvkov popisuje schematické zapojenie na obrázku 11. Tranzistor M_{rd} plní funkciu zosilňovača a zároveň prevádza naakumulovaný náboj na napätie. Odpadáva tu teda sekvenčné zosilnenie signálu, čo má za následok rýchlejšie snímání a zníženie nežiadúceho šumu. Druhý tranzistor M_{rs} slúži k vyresetovaniu fotodiódy. Posledný spínač M_{sel} slúži k spínaniu stĺpcov, a teda plní identickú funkciu ako pri pasívnom riešení.



Obr. 11: Schéma pasívneho CMOS snímača

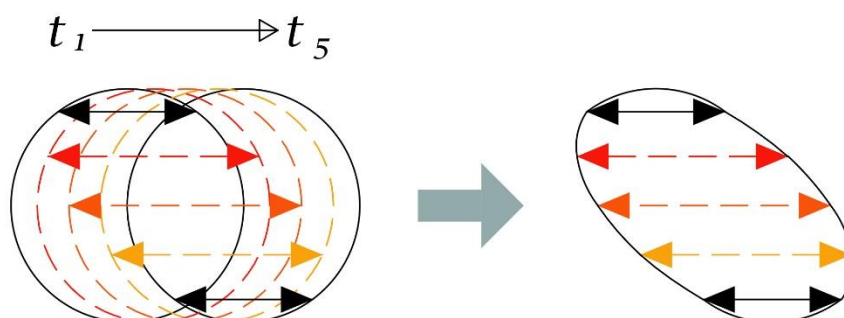
Senzory CMOS ponúkajú výhodu v tom, že obrazová informácia je na každom pixely prevedená na napätie a zosilnená, takže proces snímania je v porovnaní s CCD rýchlejší.

V oblasti strojového videnia bolo v minulosti dominantné riešenie s použitím CCD snímačov kvôli ich jednoduchšej konštrukcii. V súčasnosti to už tak nie je, pretože do vývoja senzorov CMOS boli vložené značné investície. Vo väčšine zobrazovacích aplikácií prekonávajú CCD, pretože dokážu obraz nasnímať rýchlejšie a taktiež dosahujú nižších hladín šumu. Naopak, vhodnejšou alternatívou v aplikáciách, kde je nižšia hodnota jasu, sa javia CCD. To isté platí pri snímaní obrazu v infračervenej alebo ultrafialovej oblasti. Voľba obrazového snímača kamery je teda veľmi závislá na charaktere aplikácie, v ktorej je použitý, a okolitých podmienkach [9].

3.2 Uzávierka

Je veľmi dôležitou súčasťou kamery, pretože ovplyvňuje množstvo svetla dopadajúceho na obrazový snímač. U klasického fotoaparátu sa využíva mechanická uzávierka, a k regulácii množstva svetelného toku slúži clona. Je to mechanické zariadenie skladajúce sa z tenkých kovových lamiel, vytvárajúce prstenec.

Zaujímavejším prípadom je elektronická uzávierka. Schematické zobrazenie na obrázku 11 poskytuje jej základné prevedenie s použitím troch tranzistorov a tento typ uzávierky sa nazýva rolovacia, alebo tiež posuvná uzávierka. Jednotlivé obrazové prvky sú resetované po riadkoch v určitých časových úsekoch, pred načítaním ďalšieho riadku. Čas medzi vynulovaním a získaním obrazových informácií na jednotlivých riadkoch snímača sa nazýva čas expozície. Táto forma uzávierky je kompatibilná s použitím v aplikáciách, kde sú objekty snímané staticky. Naopak, menej vhodné je použitie rolovacej uzávierky v dynamických aplikáciách, kde môže u pohybujúcich sa objektov dochádzať k deformáciám výsledného obrazu, ako vidieť na obrázku 12.



Obr. 12: Deformácia obrazu pri snímaní formou postupnej uzávierky

Riešením je doplnenie obvodu o dva dodatočné tranzistory a kapacitu. Pridaním ďalšieho spínača možno dosiahnuť, že všetky svetlocitlivé prvky sú resetované v tom istom čase. Následne je možné pomocou druhého spínača vystaviť všetky pixely rovnakému času expozície, čo má za následok, že nadobudnutý náboj je spracovávaný v tom istom čase. Po nadobudnutí náboja je svetlocitlivý prvok resetovaný prostredníctvom pridaného kondenzátora [8]. Ošetrovanie tohto nedostatku vedie k zobrazeniu reálnej scény. Tento spôsob snímania obrazu sa nazýva globálna uzávierka.

3.3 Elektrické obvody

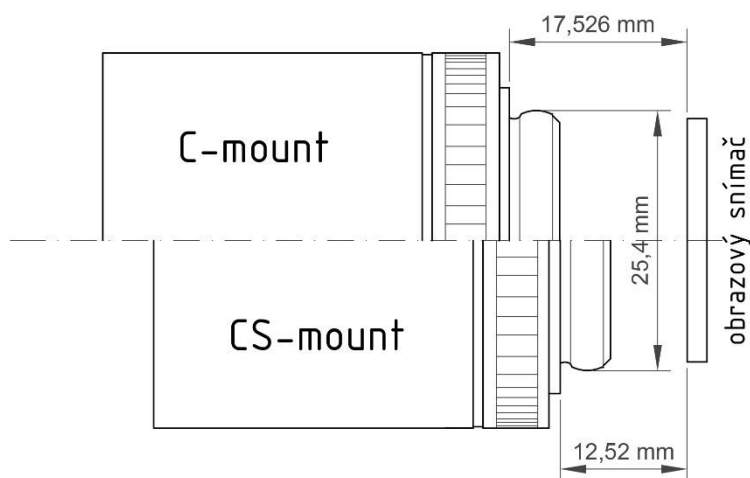
Spoločne so snímačom sú v puzdre kamery umiestnené elektrické obvody, ktoré slúžia na obsluhu snímača, a ako prepojovacie rozhranie pre iné zariadenia. Elektronika poskytuje užívateľovi možnosť optimálneho nastavenia kamery. Väčšinou je možné nastaviť:

- celkový jas,
- kontrast alebo zosilnenie,
- dobu akumulácie náboja - uzávierku.

Elektronika kamery musí ďalej poskytovať možnosť synchronizovať záznam snímku s časovaním výrobnjej operácie. Z tohto dôvodu dokážu kamery zaznamenávať obraz v niekoľkých režimoch. Snímky môžu byť zaznamenávané v pravidelných intervaloch alebo na základe povelu s komunikačným rozhraním. Ďalšou z možností je režim voľného záznamu, kde je frekvencia snímkovania daná dobou pre získanie snímku a jeho zobrazenie v príslušnom rozhraní.

3.4 Optická sústava

Optická sústava kamerového snímača môže obsahovať integrovaný osvetľovač a takmer vždy je jej súčasťou objektív. Ten sa v súčasnosti pripája prostredníctvom montážnych päťíc C-mount alebo CS-mount. Päťice sú vzájomne pomerne ťažko rozlíšiteľné, pretože oba typy majú rovnaký pripojovací závit s priemerom 25,4 mm so stúpaním 32 závitov na palec. Rozdiel je v ohniskovej vzdialenosti príruby od aktívnej plochy snímača, ako vidieť na obrázku 13.

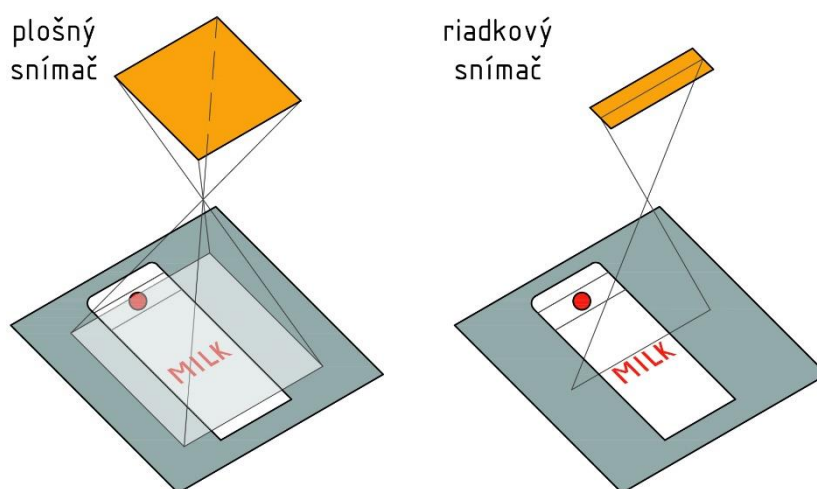


Obr. 13: Porovnanie objektívov C - mount a CS - mount

U staršieho prevedenia CS-mount sa predpokladá ohnisková vzdialenosť od príruby 17,526 mm. Naopak u prevedení C-mount je to 12,52 mm. Objektívy novšej rady C-mount je možné pomocou dištančnej podložky použiť aj u staršieho rozhrania CS-mount. Späťne to však nie je možné, pretože s použitím objektívu typu CS-mount na kamere s päťicou C-mount nie je možné zaostriť [10]. Objektívy sú významnou a pomerne rozsiahlou oblasťou strojového videnia, a preto im bude v ďalšom texte venovaná samostatná kapitola.

3.5 Typy kamier

Súčasný trh ponúka pomerne široké možnosti pri výbere kamery. V niektorých aplikáciách môže byť kladený dôraz na konštrukčné rozmery. V iných zasa na vysoký výpočtový výkon alebo cenu. Použitie jednotlivých riešení sa naprieč aplikáciami vzájomne prekrýva, a preto nie je vhodné kamery rozdeliť podľa ich hardvérovej výbavy. Vhodnejším sa javí rozdelenie podľa toho, akým spôsobom kamera zaznamenáva obraz, a na základe tejto úvahy je možné kamery rozdeliť nasledovne:



Obr. 14: Snímání plošným a řádkovým snímačem

- **řádkové.** Kamera obsahuje snímač, který představuje iba jeden řádek pixelov, ako vidieť na obrázku 14 vpravo. Objekt je snímaný po riadkoch a kamerové rozhranie pre spracovanie informácií týmto spôsobom skladá obraz dokopy. Táto metóda je vhodná na snímání priebežných materiálov a objektov pohybujúcich sa vysokou rýchlosťou [7]. Výhodou oproti plošnej kamere je absencia limitu pre vertikálnu zložku rozlíšenia, čím je umožnené sledovanie scény vo vyššom rozlíšení. Príkladom takejto aplikácie môže by kontrola farebnej tlače, povrchu oceľových plechov alebo triedenie ovocia a zeleniny. Pre řádkové kamery je typické použitie snímača typu CMOS.
- **plošné** sú najbežnejším typom kamier, používaných v oblasti strojového videnia, a ich obrazové snímače sú tvorené maticou svetelných detektorov. Obraz je zaznamenávaný v jednom expozičnom cykle a v tomto prípade je snímaná plošná oblasť, ako vidieť na obrázku 14 vľavo. Použitie plošných kamier je doporučené pre zaznamenávanie statických snímok a ich použitím je možné dosiahnuť priaznivejšie hodnoty kontrastu sledovanej oblasti, v porovnaní s řádkovou kamerou [2].

4 OBJEKTÍVY A ICH VLASTNOSTI

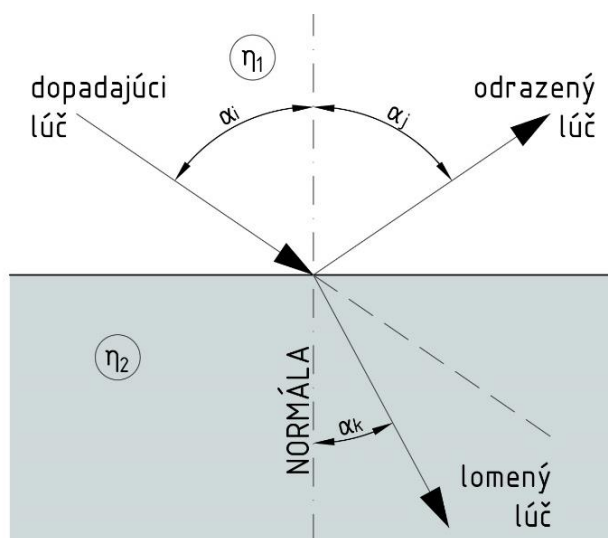
Objektívy, používané v strojovom videní, sa skladajú zo šošovky alebo sústavy šošoviek, pomocou ktorých sa na obrazovom snímači vytvára geometricky zmenený obraz scény. Spoločne s osvetľovačmi tvoria objektívy optickú sústavu systému strojového videnia.

4.1 Základné zákony geometrickej optiky

Na vyššie spomenutú optickú sústavu sa vzťahujú nasledujúce štyri základné zákony geometrickej optiky [4]:

- priamočiare šírenie svetelných lúčov v homogénnom prostredí,
- nerušená superpozícia svetelných lúčov,
- zákon odrazu,
- zákon lomu.

Prvé dva zákony sú jednoducho vysvetliteľné na dierkovej komore, zobrazenej na obrázku 1. Vplyvom priamočiareho šírenia svetelných lúčov je výsledný obraz otočený. U dierkovej komory prechádzajú dopadajúce lúče bodom, v ktorom sa vzájomne križujú, a v tomto mieste platí nerušená superpozícia svetelných lúčov.



Obr. 15: Odraz a lom dopadajúceho svetla na rozhraní dvoch médií

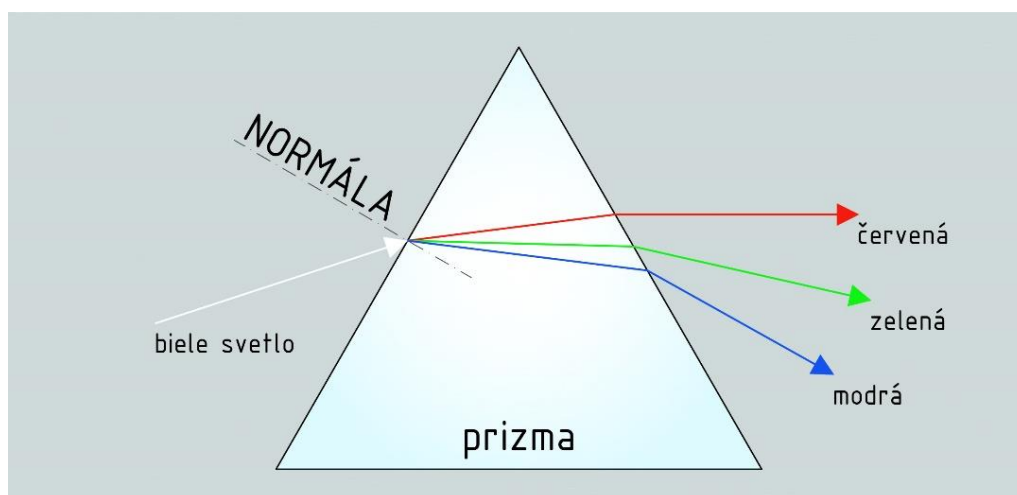
Odraz a lom svetla zobrazený na obrázku 15, prebieha na rozhraní dvoch transparentných médií, pričom normála predstavuje ich hranicu. Pre odrazené lúče platí zákon odrazu, ktorý hovorí že uhol odrazu α_r je rovný uhlu dopadu svetelného lúča α_i a odpovedá mu rovnica (4).

$$\alpha_i = -\alpha_j \quad (4)$$

Lom svetla je závislý na indexe lomu prostredia n , ktorým prechádza a dopadajúcom uhle α . Index lomu určitého média je definovaný ako pomer rýchlosti svetla vo vákuu v_0 voči rýchlosti svetla v danom médiu v . Na základe týchto poznatkov možno formulovať zákon lomu, ktorý je tiež známy ako Snellov zákon a odpovedá mu rovnica (5).

$$n_1 \sin \alpha_i = n_2 \sin \alpha_k \quad (5)$$

Rýchlosť šírenia svetla v závisí od vlnovej dĺžky λ a z toho vyplýva, že index lomu n je funkciou vlnovej dĺžky. Tento jav sa nazýva disperzia svetla a je zobrazený na obrázku 16. Biele svetlo je totiž zmesou rôznych vlnových dĺžok a pri lome sa rozdelí do zložiek rôznych vlnových dĺžok alebo farieb.



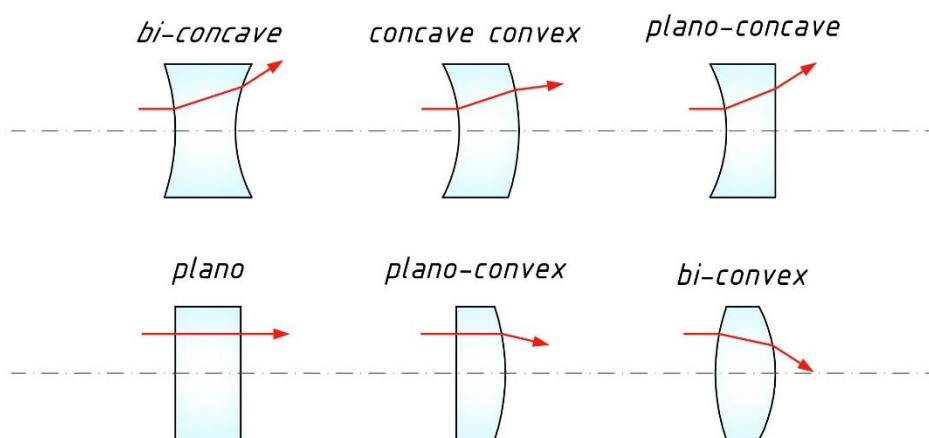
Obr. 16: Disperzia dopadajúceho svetla na prizmu⁷

4.2 Druhy šošoviek a vlastnosti objektívov

Šošovky v objektíve sú usporiadané tak, aby sa prostredníctvom optickej sústavy vytvoril na kamerovom snímači ostrý, prevrátený obraz. Ich tvar, počet a usporiadanie závisí na zadaných parametroch, akými sú ohnisková vzdialenosť, svietivosť alebo minimálna vzdialenosť zaostrenia. Šošovky možno rozdeliť do nasledovných základných skupín:

⁷ Prizma - trojboký hranol z homogénnej látky.

- **spojky.** Dopadajúce svetelné lúče sa menia na zbiehavé a pretínajú sa v bode nazývanom ohnisko. Pomocou spojok vzniká skutočný obraz. Na obrázku 17 spadajú do tejto skupiny šošovky plan-konvexné a bi-konvexné.
- **rozptylky.** V druhom prípade majú dopadajúce svetelné lúče rozbiehavý charakter a vzniká zdanlivý obraz. Na obrázku 17 patria do tejto kategórie šošovky bi-konkávne, konkávno-konvexné a plano-konkávne.
- **špeciálne tvary.** Objektívy v strojovom videní sú väčšinou tvorené spojkami alebo rozptylkami, ale občas sa v nich vyskytuje sklo, ktoré výsledný obraz nijako netransformuje a na obrázku 17 odpovedá variantu plano.



Obr. 17: Základné typy šošoviek používané v objektívoch

Najpodstatnejšou vlastnosťou objektívov je ohnisková vzdialenosť, ktorá je daná konštrukciou objektívu. Predstavuje vzdialenosť medzi optickým stredom objektívu a rovinou, na ktorej dokáže objektív zaostriť snímaný objekt. Tento parameter v kombinácii s veľkosťou kamerového snímača určuje zorný uhol. Všeobecne platí, že čím väčšia je ohnisková vzdialenosť, tým je obrazový uhol menší. V aplikáciách strojového videnia je doporučené použitie objektívov s pevnou ohniskovou vzdialenosťou. U objektívov s variabilným ohniskom nie je možné zaistiť stabilné parametre v celom rozsahu nastavenia.

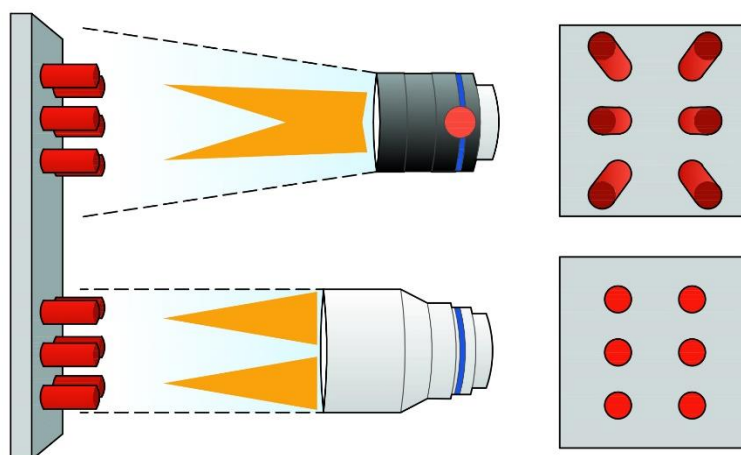
Svetelnosť objektívu predstavuje schopnosť objektívu prepúšťať svetlo, značí sa f spoločne s číselným údajom, napríklad $f/2,8$. Čím nižšia je číselná hodnota, tým viac svetla je objektív schopný prepustiť, a tým kratší čas expozície je potrebný. K regulácii dopadajúceho svetla slúži clona, ktorá bola popísaná v kapitole venovanej kamerám.

Ďalším významným parametrom je minimálna vzdialenosť zaostrenia, ktorá vyjadruje ako ďaleko môže byť objekt, aby naň dokázal objektív zaostriť. Pri minimálnej vzdialenosti zaostrenia dosahujú objektívy maximálne zväčšenie. Ak je vzdialenosť pri zaostrení menšia ako nekonečno, predlžuje sa tým ohnisko a klesá svetelnosť objektívu.

4.3 Druhy objektivov

Výrobcovia v súčasnosti disponujú rozmanitým portfóliom objektivov. V závislosti na druhu perspektívy je možné ich rozdeliť do troch základných skupín:

- **endocentrické** sú základným typom objektivu, ktorý sníma perspektívu obdobne ako ľudské oko. Disponuje veľkou pracovnou vzdialenosťou, s použitím malej šošovky. Tieto objektívy perspektívne skresľujú výsledný obraz, ako vidieť na obrázku 18. [10]
- **telecentrické**. Objekty sú snímané bez perspektívneho skreslenia. Použitie takéhoto objektivu je vhodné v aplikáciách, kde sú vysoké požiadavky na presnosť merania. Priemer šošovky musí byť minimálne taký veľký ako snímaný objekt. Výsledný obraz je opäť vidieť na obrázku 18 [6].
- **hypercentrické** ponúkajú malú pracovnú vzdialenosť, čoho následkom môžu byť komplikácie pri návrhu osvetľovača. Veľkosť šošovky musí byť väčšia ako snímaný objekt. Z hľadiska zobrazenia scény ponúkajú opačné perspektívne skreslenie ako endocentrické objektívy.



Obr. 18: Zobrazenie scény pomocou endocentrického a telecentrického objektivu

Okrem objektivov s pevným ohniskom sú na trhu k dispozícii varifokálne a zoom objektívy s premenlivou ohniskovou vzdialenosťou. Rozdiel medzi týmito dvoma druhmi spočíva v tom, že varifokálny objektív musí byť vždy pri zmene ohniskovej vzdialenosti zaostrený. Objektív zoom zostáva naopak vždy zaostrený. Ďalším typom sú makro objektívy, ktorých použitie je vhodné v prípadoch, kde sú vysoké požiadavky na rozlíšenie pri snímaní objektov na krátku vzdialenosť. Na trhu sú k dispozícii aj makro objektívy umožňujúce zoom. Špecifickým druhom je 360° objektív, známy tiež ako rybie oko. Je určený pre prípady, kde sa vyžaduje snímanie scény za použitia čo najmenšieho

počtu kamier. Osobitým druhom sú objektívy SWIR, MWIR a LWIR, ktoré sa používajú v infračervenej termografii. Z anglického prekladu Short Wavelength Infrared (SWIR) vyplýva, že tento druh objektívu je určený na zachytenie krátkych vlnových dĺžok infračerveného žiarenia. Obdobne platí, že MWIR a LWIR sú určené na snímanie stredných a krátkych vlnových dĺžok infračerveného žiarenia. Obrázok 19 poskytuje predstavu o reálnej podobe objektívov v priemyselnej praxi.



Obr. 19: Objektív s pevným ohniskom BASLER C11-1620-12M-P a telecentrický objektív OPTO ENGINEERING TC1MHR016-C

4.4 Vady a skreslenie objektívov

Každá optická sústava trpí určitými vadami a skreslením, ktoré sú spôsobené vlnovým charakterom svetla, jeho lomom alebo nedokonalosťou zostavy. Patria sem [2]:

- **perspektívne skreslenie obrazu.** Tento nedostatok sa vyskytuje u endocentrických objektívov. V rade aplikácií, kde sa vyžaduje kontrola prítomnosti objektov, ich počítanie alebo kontrola farebnosti, to nepredstavuje väčší problém. Naopak, pri meracích úlohách je doporučené použitie telecentrického objektívu.
- **optické vady** sa prejavujú pri všetkých objektívoch a je možné ich zmierniť iba čiastočne. Patria sem vady sférické, astigmatické, asymetrické, chromatické, a taktiež súdkovité, poduškovité a vlnovité skreslenie.
- **centrovanie** predstavuje zníženie ostrosti v rohoch snímaného obrazu. Prejavuje sa pri odclonenom objektíve. Privieraním clony do určitej hodnoty sa táto závada znižuje.
- **vinetácia.** Ide o rovnomerný úbytok jasů od stredu k okrajom obrazu. Riešenie je identické ako v prípade centrovania, privieraním clony.
- **chromatická vada** je následkom rozdielného indexu lomu jednotlivých vlnových dĺžok farebného spektra. Prejavuje sa na ostrých a kontrastných hranách pri

snímání objektov. Vadu sa snažia výrobcovia objektívov korigovať použitím materiálov s rôznym indexom lomu.

- **reflexy** predstavujú nežiadúce odlesky svetla na jednotlivých šošovkách v sústave. Na snímanom obraze sa prejavujú ako svetelné škvrny a závoje. S rastúcim množstvom optických členov je objektív náchylnejší na túto vadu. Riešením je použitie antireflexných vrstiev na šošovkách a špeciálne povrchové spracovanie konštrukčných prvkov objektívu.

5 VLASTNOSTI A POUŽITIE OSVETĽOVAČOV

Osvetľovače majú rovnako, ako objektívy alebo kamery významný podiel na výslednej podobe snímanej scény. Prostredníctvom kamery a objektívu sú dáta získavané a transformované do podoby jasového obrazu, avšak zdrojom týchto informácií je svetlo poskytované osvetľovacou sústavou. Úlohou osvetľovača je dosiahnuť v záujmovej časti scény čo najvyšší kontrast a minimalizovať rušivé vplyvy prostredia.

5.1 Vlastnosti svetla dopadajúceho na objekt

Svetlo dopadajúce na záujmový objekt sa rozdeľuje do troch častí [4], pričom R predstavuje množstvo odrazeného svetla, A je svetlo absorbované objektom a T odpovedá zložke svetla, prechádzajúceho objektom:

$$R + A + T = 100\%, \quad (6)$$

Každý sledovaný objekt je z hľadiska odrazu, prechodu a absorpcie svetla špecifickým prípadom. Tieto parametre sú predovšetkým závislé na uhle dopadu a vlnovej dĺžke svetla dopadajúceho na objekt. Smer, akým sa svetlo odrazí, je závislý na tvare objektu, pričom platí, že uhol odrazu je rovný uhlu dopadu. Treba však dbať aj na spôsob, akým je svetlo odrazené a to je závislé na mikroštruktúre povrchu. Kvalita, drsnosť materiálu, a taktiež povrchová úprava ovplyvňujú množstvo rozptýleného svetla v okolí objektu. Množstvo odrazeného svetla R vyjadruje vzťah (7), kde φ_r odpovedá odrazenému a φ_0 dopadajúcemu svetelnému toku:

$$R = \varphi_r / \varphi_0 \quad (7)$$

Špeciálnym prípadom je úplný odraz, ktorý prebieha v transparentných médiách, akými sú napríklad sklo, voda alebo transparentné plasty. V závislosti na množstve svetla prechádzajúceho objektom sa pozorovaný objekt javí byť svetlejší, čo je nežiadúce, pretože dochádza k strate kontrastu. Množstvo svetla prechádzajúce objektom je dané vzťahom (8), pričom φ_t vyjadruje množstvo prechádzajúceho svetelného toku a φ_{t0} predstavuje dopadajúce svetlo:

$$R = \varphi_t / \varphi_0 \quad (8)$$

Zvyšná časť svetelnej energie je absorbovaná objektom a premenená na teplo. Absorpcia sa odvíja od materiálových vlastností telesa. Vplyvom priamočiareho šírenia svetelných lúčov v homogénnom prostredí dochádza na hranách objektov k deformácii obrazu. Množstvo rušenia je závislé na vlnovej dĺžke osvetlenia. Znížením vlnovej dĺžky

do oblasti modrého svetla je možné znížiť rušenie na hranách objektu takmer o polovicu. Vo väčšine prípadov využívajú osvetľovače v oblasti strojového videnia svetlo s vlnovou dĺžkou od 380 do 1100 nm. To odpovedá svetelnému spektru od modrého, až po infračervenú oblasť.

5.2 Svetelné zdroje

Základným prvkom osvetľovača je svetelný zdroj. V závislosti na forme premeny svetla je možné zdroje rozdeliť do dvoch skupín [2]:

- tepelné zdroje,
- luminiscenčné zdroje.

Skupina tepelných svetelných zdrojov zahŕňa rôzne žiarovky, žiarivky a výbojky. Ako vyplýva z názvu, pôvodcom svetla je tepelný zdroj. U žiaroviek sa používa kovové vlákno a u výbojky vzniká svetlo elektrickým výbojom v plyne. Výbojka sa skladá z kovovej trubice, v ktorej sú umiestnené elektródy. Trubica je naplnená inertným plynom a na jej vnútornej strane môže byť nanosený luminofor⁸. Výbojky pracujú pri vysokej prevádzkovej teplote a na tomto parametri závisí aj ich účinnosť. Ich použitie je v súčasnosti pomerne raritné, pretože v aplikáciách strojového videnia je využitá iba malá časť ich svetelného spektra, avšak stále je možné stretnúť sa s nasledovnými tepelnými zdrojmi:

- **halogénové žiarovky** sú zdrojom bieleho svetla a dosahujú vysokých hodnôt jasu. Nevýhodou je podobne, ako u ostatných tepelných zdrojov, nízka životnosť a zvýšená citlivosť voči vibráciám.
- **žiarovky s kovovým vláknom.** Teplota farby odpovedá zhruba slnečnému žiareniu. Majú vyššiu životnosť ako halogénové žiarovky, ale za cenu zvýšených nákladov.
- **výbojky** sú blikajúcim zdrojom svetla, ktorý poskytuje extrémne hodnoty jasu. Nevýhodou je opäť vysoká cena, a v prípade, že je v danej aplikácii zdroj elektromagnetického žiarenia, môže dochádzať k potenciálnym problémom s elektromagnetickou kompatibilitou.
- **žiarivky** sa používajú zväčša k osvetleniu veľkých oblastí. Výhodou sú nízke náklady a dostupnosť rôznych teplôt svetla. Nevýhodou zase nízka životnosť a strata jasu vplyvom starnutia.

⁸ Luminofor – látka schopná absorbovať a čiastočne uchovať energiu žiarenia a následne ju vyžiariť vo forme svetla.

Luminiscenčné svetelné zdroje sú realizované pomocou laseru alebo LED⁹ diód a v súčasnosti ide o dominantné riešenie v oblasti strojového videnia. V porovnaní s tepelnými zdrojmi svetla poskytujú vysokú účinnosť za nízkych teplôt, čo môže byť výhodné v aplikáciách, kde je problémovým faktorom teplo. Luminiscenčné zdroje poskytujú vysokú odolnosť voči vibráciám a disponujú vysokou životnosťou. Patria sem:

- **laser** sa vyskytuje v strojovom videní zriedkavo. Dôvodom je fakt, že zdroj má podobu koncentrovanej energie. To znamená, že použitie lasera podlieha dodatočným bezpečnostným opatreniam.
- **LED.** Kombinujú radu výhod pre použitie v priemyselnom prostredí. Vyznačujú sa dlhou životnosťou v ráde desiatok tisíc hodín, v závislosti na podmienkach použitia a nízkymi nárokmi na údržbu. Sú odolné voči vibráciám, a v porovnaní s tepelnými zdrojmi generujú len zlomok tepla, s čím súvisí aj nízka spotreba energie. Svetelné spektrum u LED zdrojov má takmer monochromatický charakter a je možné kombinovať rôzne vlnové dĺžky. V prípade, že je tento zdroj dlhodobo vystavený teplotám nad 60 °C, dochádza k urýchleniu starnutia.

5.3 Geometria osvetlenia

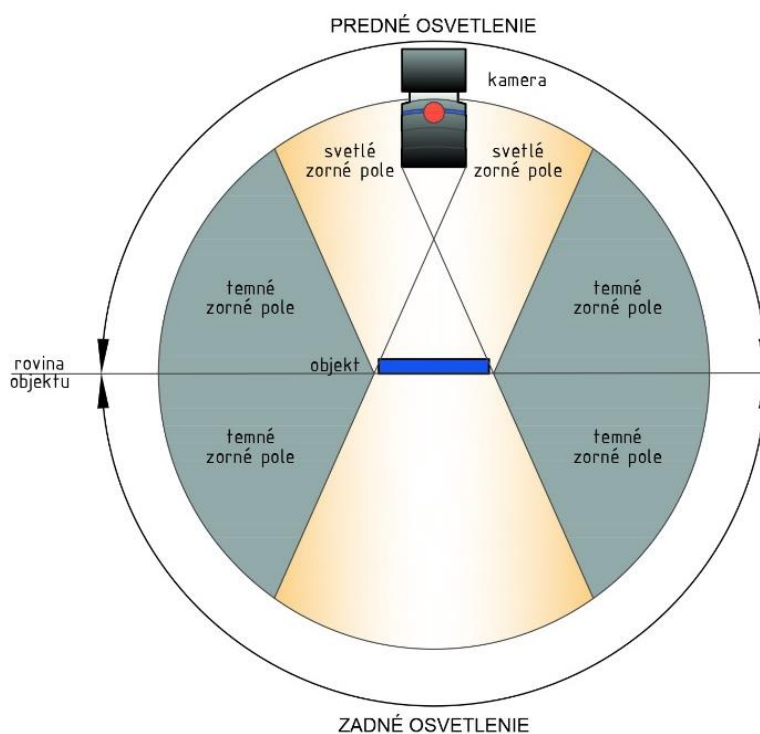
Účelom osvetľovača je dosiahnuť požadované hodnoty kontrastu v záujmovej oblasti. To je možné doceliť vhodnou voľbou geometrie osvetlenia, a taktiež je potrebné zohľadniť smerové vlastnosti svetelných lúčov. Existujú dva základné prístupy nasvetlenia objektov. Prvým z nich je použitie difúzneho osvetlenia, ktorým je možné doceliť rozptýl svetelných lúčov pod určitým uhlom. Druhým prípadom je svetlo smerované, ktoré je možné aplikovať vo viacerých variantoch. Prehľad jednotlivých možností poskytuje schéma na obrázku 20. V situáciách, kde sa kladie dôraz na zobrazenie členitosti objektu, je správnou voľbou smerované svetlo. Naopak, použitie difúzneho svetla je vhodné pre zvýraznenie kontrastu spôsobeného absorpciou povrchu objektu.

Rovina objektu na obrázku 20 rozdeľuje osvetlenie na priame a zadné, pričom v prípade priameho osvetlenia sa ďalej delí na svetlú a temnú oblasť zorného poľa. Osvetlenie objektu v oblasti svetlého zorného poľa je možné realizovať dvoma spôsobmi, a to čelným alebo zadným osvetlením. V prípade čelného osvetlenia sa predpokladá, že svetelné lúče odrazené od objektu sú smerované cez objektív na snímač kamery. Tento druh osvetlenia sa používa k vytvoreniu kontrastu na lesklých plochách.

Ďalšou z možností je využitie oblasti temného zorného poľa a to formou čelného osvetlenia. Svetlo smerované týmto spôsobom odráža členité časti objektu priamo do

⁹ Light Emitting Diodes (LED) – diódy emitujúce svetelné žiarenia.

senzora kamery, zatiaľ, čo je svetlo dopadajúce na povrch telesa odrazené mimo. Poslednou metódou je zadné osvetlenie. Používa sa hlavne v meracích aplikáciách alebo tam, kde je potrebné sledovať kontúru objektov [2].



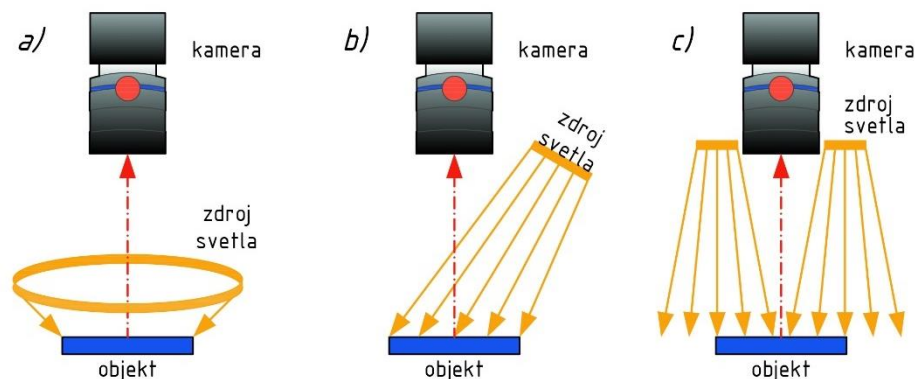
Obr. 20: Geometria osvetlenia objektu

5.4 Typy osvetľovačov

Z konštrukčného hľadiska je v súčasnosti na trhu mnoho rozličných prevedení osvetľovačov. Mnoho z nich je zameraných na špeciálne úlohy, ale väčšina výrobcov má v ponuke nasledujúce základné typy [7] [11]:

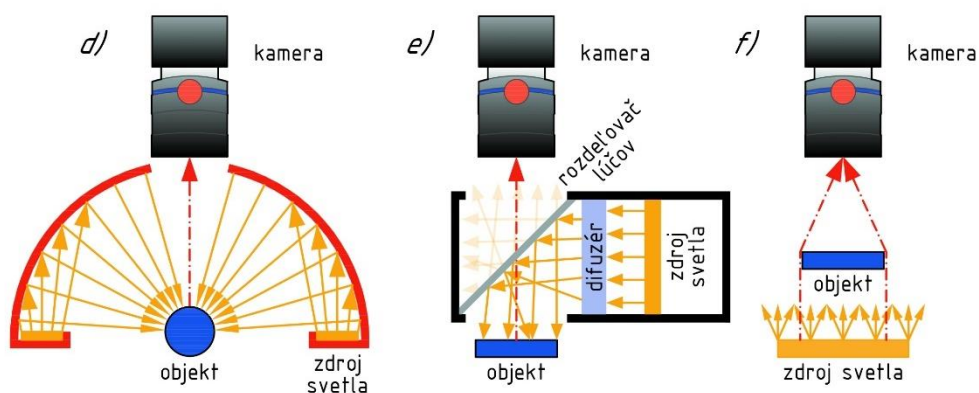
- **dark-field.** Poskytujú rovnomerne smerované svetlo v rovine okolo osi snímania objektu kamerou. Osvetlenie sa umiestňuje v temnom pásme predného zorného poľa a jeho použitie je vhodné k zvýrazneniu embosovaných, gravírovaných alebo vyrazených značiek a vzorov v materiáli.
- **osvetľovacie polia** sú vhodné k osvetleniu objektov v oblasti temného zorného poľa ako zdroj smerového svetla. Taktiež sa používajú ako zdroj rozptýleného svetla vo svetlej oblasti zorného poľa, pričom rozptyl svetla je daný vyžarovacím uhlom použitých LED diód. Konštrukčné prevedenie môže byť maticové alebo stĺpcové. V druhom prípade sa používa kombinácia niekoľkých osvetľovačov tak, aby bol objekt osvetlený z viacerých smerov.

- **prstencové**, tiež známe ako kruhové osvetľovače, sa používajú na osvetlenie objektu v oblasti svetlého zorného poľa a sú zdrojom rozptýleného svetla. Prostredníctvom kruhového osvetľovača je možné eliminovať zatienenie objektu. Nevýhodné je naopak použitie u reflexných objektov, pretože môže spôsobovať odlesky.



Obr. 21: Schéma umiestnenia osvetľovačov: a) Dark-field, b) Osvetľovacie pole, c) Prstencové

- **kupolové** osvetľovače majú tvar pologule, čím je možné úplne eliminovať zatienenie objektu. Tento osvetľovač operuje v oblasti svetelného zorného poľa a je zdrojom homogénneho rozptýleného svetla. Použitie je vhodné v aplikáciách, kde je potrebné detegovať povrchové vady, reflexné a nerovnomerné povrchy.
- **koaxiálne** sa skladajú zo svetelného zdroja, difuzéra, ktorý slúži k optimálnemu rozptylu svetla a rozdeľovača lúčov vo forme polopriepustného zrkadla. Účelom zrkadla je rovnomerne rozdeliť lúče dopadajúce na objekt. Existujú spojitý a pulzný koaxiálne svetlá, a ich hlavnou nevýhodou je vysoká cena a obmedzené zorné pole.



Obr. 22: Schéma umiestnenia osvetľovačov: d) Kupolové, e) Koaxiálne, f) Back-light

- **back-light.** Ako vyplýva z názvu, ide o osvetľovač, ktorý slúži na osvetlenie objektu zo zadnej časti. Použitie je vhodné pri meracích aplikáciách, kde je potrebné zvýrazniť kontúru meraného objektu alebo v prípadoch, kde sa vyžaduje presvetlenie objektu, ako napríklad kontrola vlákna žiarovky. Z konštrukčného hľadiska ide o LED diódové pole s veľkoplošným difuzérom.

5.5 Riadenie osvetľovačov a rušivé vplyvy

Takmer všetky prvky systému strojového videnia disponujú digitálnymi výstupmi na to, aby bolo možné zosynchronizovať osvetlenie s kamerovým snímačom. Táto funkcia je dôležitá, ak je potrebné svetlo zapínať iba v momente expozície snímku. Druhou možnosťou riadenia osvetľovačov je regulácia príkonu, čím je ovplyvnené množstvo svetelného toku.

Pri návrhu vhodného osvetľovača je treba vziať do úvahy aj prípadné rušivé vplyvy. Keďže ide o elektronické zariadenie, problémovým faktorom je prach a nečistoty, ktoré priamo vplyvajú na svietivosť. Ďalším negatívom, ktoré je potrebné eliminovať sú externé svetelné zdroje a denné svetlo. Ich parametre sú nepredvídateľné, pretože závisia na počasi, ročnom období a ďalších faktorov. Tento nedostatok je možné odstrániť zatienením týchto zdrojov. Súčasne je potrebné zaistiť aj polohu objektu v zornom poli tak, aby sa zmenou polohy nemenili hodnoty kontrastu [11].

6 PROSTRIEDKY PRE SPRACOVANIE OBRAZU

V kapitole zaoberajúcej sa rozborom systému strojového videnia a vznikom digitálneho obrazu boli spomenuté prostriedky a metódy, prostredníctvom ktorých je nasnímaný obraz spracovávaný. Nasledujúci text bude venovaný popisu jednotlivých prístupov z hľadiska realizácie spracovania dát, a taktiež predstaveniu zberníc, ktoré sprostredkovávajú komunikáciu medzi kamerou a vyhodnocovacím zariadením.

6.1 Spracovanie dát z hľadiska realizácie

Existujú tri systémové riešenia, akými je možné nasnímané dáta spracovávať. Prvou z nich je spracovávanie informácií priamo v zariadení, bez potreby použitia dodatočnej výpočtovej techniky. Ide o doménu inteligentných kamier, ktoré disponujú dostatočnou hardvérovou výbavou, a sú schopné namerané výsledky interpretovať nadradenému systému alebo do vizualizácie. Výhodou tohto riešenia sú minimálne konštrukčné rozmery zariadenia a absencia kabeláže potrebnej na pripojenie k vyhodnocovaciemu hardvéru. Vstupné náklady inteligentnej kamery odpovedajú ich rozsahu použitia, sú to napríklad aplikácie, kde sú rozpoznávané kódy, objekty, poloha, alebo sú kontrolované tvary a rozmery. Druhou možnosťou je PC systém, ktorý pozostáva z externej kamery pripojenej k počítaču. Táto forma systému nie je vhodná pre použitie v priemyselnom prostredí kvôli nízkej odolnosti voči vonkajším vplyvom. Na druhej strane, osobný počítač ponúka vysoký výpočtový výkon, čo je možné využiť v didaktických a výskumných aplikáciách. Pri riešení niektorých úloh, akými sú napríklad kontrola tvaru, rozmerov alebo povrchová kontrola je potrebné, aby zvolený systém disponoval dostatočným výpočtovým výkonom, a zároveň dokázal odolávať vibráciám a prachu v priemyselnom prostredí. V tomto prípade je potrebné do zostavy implementovať priemyselný PC a vzhľadom na to, že väčšinu bežných úloh je možné efektívne vyhodnotiť pomocou kombinácie inteligentných kamier, sú špeciálne úlohy riešené individuálne. Zväčša návrhom systému na mieru. Z toho vyplýva, že táto forma spracovania nameraných dát je cenovo najnáročnejšia [1].

6.2 Zbernice

V počiatkoch strojového videnia boli využívané analógové kamery a signál bol prenášaný po koaxiálnom kábli do vyhodnocovacieho zariadenia alebo na monitor. Okrem nasnímaných dát niesol takýto signál taktiež impulzy, zabezpečujúce synchronizáciu kamery s výstupným zariadením. Farebný obraz bol prenášaný paralelne po troch koaxiálnych kábloch a intenzita jednotlivých zložiek odpovedala napäťovým úrovňam vo vodičoch.

V súčasnosti sa analógové metódy už veľmi nevyužívajú a boli nahradené novšími zbernicami pre spracovanie digitálneho obrazu. Každá z nich disponuje špecifickou konštrukciou konektorov, kabeľáže, a taktiež prenosovými vlastnosťami. Pri voľbe zbernice je potrebné zohľadniť šírku pásma, ktorá vyjadruje množstvo obrazových informácií prenášaných z kamery do výstupného zariadenia. Šírka pásma ovplyvňuje snímkovaciu frekvenciu, rozlíšenie obrazu a množstvo dát pripadajúcich na jeden pixel.

Prechod na digitálny obraz je spájaný so zbernicou IEEE 1394, ktorá je tiež známa pod označením FireWire. Pre kamerové systémy sa používala varianta vychádzajúca z verzie IEEE 1394b, podporujúca prenos medzi 8-bitovou kamerou so snímkovacou frekvenciou 200 obrázkov za sekundu a rozlíšením 640 x 480 bodov. V prípade pripojenia troch identických kamier pri zachovaní rozlíšenia, bola snímkovacia frekvencia znížená na 66 snímkov za sekundu. Použitie tohto rozhrania pôvodne nebolo určené k pripojeniu periférií k bežnému počítaču, avšak v priebehu času sa jej použitie rozšírilo, a v súčasnosti sa stále používa k pripojeniu digitálnych videokamier, externých diskov alebo optických mechaník. V strojovom videní je v súčasnosti táto zbernica vytlačaná novšími rozhraniami USB3 Vision a GigE Vision.

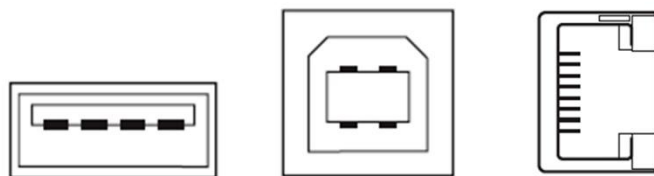
Vzhľadom na to, že rozhranie USB sa v súčasnosti používa k pripojeniu prakticky všetkých periférií u bežného počítača, nie je potrebné túto zbernicu podrobne popisovať. Pripojenie jednotlivých zariadení je možné realizovať pomocou konektorov USB typu A alebo USB typu B, ktoré sú zobrazené na obrázku 23. Táto zbernica bola v priebehu času zdokonaľovaná, čo sa prejavilo hlavne na rýchlosti prenosu. Tabuľka 1 poskytuje prehľad rýchlostí a výkonových úrovní jednotlivých verzií rozhrania USB.

Tab. 1: Verzie zbernice USB a ich špecifikácia.

Verzia	USB 1.0	USB 2.0	USB 3.0	USB 3.1
Rýchlosť prenosu	12 Mbps	480 Mbps	5 Mbps	10 Mbps
Výkon	2,5 W (pri 5 V)	2,5 W (pri 5 V)	4,5 W (pri 5 V)	4,5 W (pri 5 V)

Použitie rozhrania USB v strojovom videní sa viaže k verzii USB 2.0, ktorá disponovala postačujúcou prenosovou rýchlosťou. Vzhľadom na to, že táto zbernica nebola žiadnym spôsobom štandardizovaná k použitiu u kamerových systémov, dochádzalo k strate kompatibility medzi zariadeniami od rôznych výrobcov. Nedostatok bol odstránený s príchodom verzie USB 3.0 a zbernica bola štandardizovaná pod názvom USB Vision. Prenosová rýchlosť sa pohybuje na úrovni 400 MB/s, pri výkone 5W a napätí na úrovni 5V. Výhodou je, že toto rozhranie povoľuje Plug-and-Play¹⁰.

¹⁰ Plug-and-Play – je počítačová technológia, umožňujúca jednoduchšie rozpoznávanie pripojeného hardvéru a automatickú inštaláciu príslušných ovládačov.



Obr. 23: Na obrázku vľavo je konektor USB Type A, nasleduje USB Type B a vpravo RJ-45

GigE Ethernet vychádza z originálneho štandardu IEEE 802.3 a pre pripojenie sa používa konektor RJ-45, zobrazený na obrázku 23 vpravo. Samotný ethernet neponúka možnosť pripojenia Plug-and-Play a k nadviazaniu komunikácie sú potrebné dodatočné protokoly ako napríklad IP, TCP alebo DHCP. Zbernica bola pôvodne navrhnutá pre použitie v oblasti sietí, ale v súčasnosti sa jedná o najrozšírenejšie riešenie pre pripojenie priemyselných kamier a rýchlosť prenosu sa pohybuje na úrovni 125 MB/s.

6.3 Nástroje pre spracovanie obrazu

Po nasnímaní obrazu kamerou a prenose dát po zbernici do vyhodnocovacieho zariadenia, sú u systémov strojového videnia využívané nástroje umožňujúce ďalšiu prácu s dátami alebo k riadeniu procesu. Patria sem [2]:

- **rekonštrukcia obrazu** slúži ku korekcii údajov medzi kamerou a rozhraním, kde je obraz spracovávaný. Kamerové snímače prenášajú informácie z pixelov jednotlivo, a preto je potrebné ich dodatočne usporiadať tak, aby bolo možné získané údaje správne interpretovať.
- **časovanie a spúšťanie** je podstatné kvôli synchronizácii jednotlivých pracovných operácií v procese. Napríklad pre spustenie osvetľovača, ak nie je použité konštantné osvetľovanie.
- **práca s pamäťou** je pre strojové videnie veľmi dôležitá. Keďže sú prenášané veľké množstvá obrazových dát, je potrebné alokovať v pamäti zariadenia, kde sú dáta vyhodnocované dostatočný priestor tak, aby nedochádzalo k strate informácií.
- **Look-Up Table** alebo tiež LUT transformácia je bežne používaný nástroj, upravujúci hodnoty jasu a kontrastu v oblastiach s nízkym kontrastom.
- **oblasť záujmu** vymedzuje sledovanú oblasť a odstraňuje nepotrebné obrazové dáta mimo túto zónu.
- **korekcia tieňov** má za úlohu potlačiť zatienenie sledovaných objektov, a je možné ju realizovať buď priamo v zariadení, alebo aplikáciou príslušného algoritmu vo vyhodnocovacom rozhraní.

7 PROGRAMOVÉ PROSTRIEDKY PRE SPRACOVANIE OBRAZU

Predošlé kapitoly sa zaoberali väčšinou popisom hardvérových prostriedkov a metód používaných k získaniu digitálneho obrazu. Táto sekcia je venovaná popisu softvérových nástrojov slúžiacich k spracovaniu, vyhodnoteniu a správne porozumeniu nasnímaných dát. Ako prvé je potrebné stanoviť súradný systém, aby bolo možné obraz ďalej vyhodnocovať. Informácie poskytuje obrázok 5 v úvodnej sekcii zaoberajúcej sa vznikom digitálneho obrazu, ktorý popisuje orientáciu súradného systému a jednotlivých bodov. Programové prostriedky je možné rozdeliť nasledovne:

- **predspracovanie dát,**
- **segmentácia obrazu,**
- **popis objektov.**

7.1 Predspracovanie dát

V niektorých prípadoch sa môže stať, že získaný snímok nedisponuje dostatočnou kvalitou obrazu na to, aby bolo možné nasnímané dáta vyhodnotiť. Môže to byť spôsobené temným šumom, ktorý vzniká v kremíkovej mriežke kamery vplyvom pôsobenia tepla, alebo napríklad nevhodnou voľbou geometrie hardvérových prvkov, či nesprávnou orientáciou sledovaného objektu v priestore. Tieto nedostatky je možné potlačiť použitím transformácií, pričom existujú dva základné typy. Prvá skupina zahŕňa transformácie vylepšujúce kvalitu obrazu a patria sem [2]:

- **transformácia odtieňov sivej** je užitočná v situáciách, kedy snímok je snímok presvetlený alebo nedosahuje potrebné hodnoty kontrastu. Typickým prípadom, kedy je použitie tejto transformácie užitočné, je zmena okolitých podmienok prostredia alebo svetelného zdroja vplyvom starnutia.
- **vyhladzovanie obrazu.** Každý snímok obsahuje určité množstvo šumu, ktorý predstavuje náhodné zmeny hodnôt sivej v obraze. Rušenie sa neprejavuje na jednotlivých pixeloch, ale je rozložené rovnomerne v celom obraze. Výslednú hodnotu sivej je možné vyjadriť ako príspevok skutočnej hodnoty a rušenia, ktoré je vzhľadom na svoj stochastický charakter premenlivé.

Niektoré algoritmy vyhodnocujúce namerané výsledky vyžadujú presné umiestnenie objektov v priestore, príkladom je napríklad OCR, u ktorého sa vyžaduje horizontálna alebo vertikálna orientácia objektu. Druhá skupina transformácií sa používa na úpravu pozície objektov alebo ich orientácií v priestore a patria sem:

- **afinná transformácia** sa používa ku korekcii pozície a rotácie objektov alebo

k prípadnej zmene mierky obrazu, čo môže byť užitočné napríklad v situácii, kedy sa zmení vzdialenosť objektu od kamerového snímača.

- **projektívna transformácia** slúži ku korekcii polohových parametrov objektu v prípadoch, kde je použitie afinnej transformácie nepostačujúce. Typickým prípadom je snímanie objektov, ktorých rotácia sa dokáže zmeniť vo všetkých dimenziách priestoru.
- **polárna transformácia** je užitočná v aplikáciách, kde sa sledujú parametre na okrúhlych objektoch a ich umiestnenie je situované napríklad na obvode takéhoto predmetu. Použitím polárnej transformácie je možné docieľiť zmenu tvaru sledovaných dát z okrúhlej podoby na priamu.

7.2 Segmentácia obrazu

Po tom, ako sú obrazové dáta predspracované, je potrebné vymedziť oblasti skúmaného snímku so spoločnými vlastnosťami, a to je možné docieľiť príslušnou segmentáciou obrazu. Existuje viacero možností ako obraz segmentovať, pričom najjednoduchšou možnosťou je prahovanie. Pri tejto metóde prebieha vyhodnocovanie jasových úrovní u každého pixelu na snímku, a následne sú tieto dáta distribuované do histogramu¹¹, na ktorom je hľadaná prahová hodnota. Po určení tejto hodnoty sú body v jasových hodnotách nižších ako referenčná, vyhodnotené ako pozadie, a naopak, pixely disponujúce vyššími hodnotami jasu sú považované za poprednú časť snímku. Problém môže nastať v prípade výrazne zašumeného obrazu a vzhľadom na to, že šum spôsobuje nehomogenitu obrazu, algoritmus nemusí byť schopný určiť prahovú hodnotu. Ďalšou z možností sú regionálne metódy, ktoré segmentujú obraz na základe podobnosti jasových úrovní u jednotlivých pixelov. Taktiež je možné využiť metódy založené na detekcii hraníc v obraze alebo sledovaní kontúry [14].

7.3 Algoritmy k popisu objektov a interpretácii výsledkov

Rozhrania pre vyhodnocovanie obrazu disponujú širokou škálou algoritmov, pomocou ktorých, je možné sledované objekty popísať z kvantitatívneho alebo kvalitatívneho hľadiska. Patria sem algoritmy umožňujúce čítanie rôznych typov kódov, detekciu hrán u objektov, počítanie výrobkov, porovnávanie naučených vzorov, ale taktiež rozpoznávanie textu a rôzne meracie úlohy. Nasledujúci text je venovaný popisu detektorov, ktorých použitie sa predpokladá pri návrhu a realizácii systému strojového videnia pre kontrolu embosovaných vzorov a textu.

¹¹ Histogram – grafické znázornenie distribúcie dát formou stĺpcového grafu.

Ako prvý je spomenutý algoritmus, ktorý slúži k vyhodnoteniu úrovne jasu v záujmovej oblasti. Obraz je vyhodnocovaný meraním jasových úrovní na jednotlivých pixeloch snímku, a ich hodnoty sú následne sčítané a vydelené počtom pixelov pripadajúcich na zvolenú oblasť. V závislosti na zvolených prahových hodnotách vracia detektor pozitívny alebo negatívny výsledok merania, a taktiež umožňuje maskovanie, čím je možné presne vymedziť sledovanú oblasť v záujmovej zóne [14].

Ďalším algoritmom, ktorého použitie sa pri návrhu systému predpokladá je OCR. Slúži k rozpoznávaniu vytlačených, vypálených alebo vyrazených znakov, a ich interpretácií vo forme textového reťazca v digitálnej podobe. V oblasti strojového videnia sa vyskytujú dva prístupy, akými môže tento detektor výsledky vyhodnocovať. Prvým z nich je využitie strojového učenia, pričom pri tejto metóde je potrebné uskutočniť veľké množstvo meraní, aby bol detektor schopný poskytovať stabilné výsledky. Druhou možnosťou je porovnávanie znakov na snímku so zvolenou znakovou sadou, s čím priamo súvisí segmentácia obrazu. Pre jednotlivé znaky na obrázku je potrebné nastaviť výšku, šírku a ich vzájomnú vzdialenosť, čím je vlastne detektoru predaná informácia, v akých segmentoch má znaky porovnávať s naučenou znakovou sadou [14].

Posledný popísaný algoritmus, ktorého použitie sa ďalej uvažuje, slúži k detekcii hrán na objektoch. Miesto hrany možno charakterizovať ako rozhranie svetlých a tmavých bodov jasového obrazu, pričom zmena úrovne jasu v jednotlivých bodoch obrazu prebieha skokovo. Prvým krokom pri detekcii hrán je vyhladenie snímku, čím je zredukovaný šum a následne sú zvýraznené oblasti s výraznou zmenou intenzity. Samotná detekcia hrán môže prebiehať viacerými spôsobmi, pričom prvou z nich je metóda vyhľadávajúca extrém na základe výpočtu prvej derivácie v bodoch záujmu a patria sem metódy Sobelov, Robertsov alebo Kirschov operátor. Ďalší spôsob je založený na vyhodnocovaní druhej derivácie, a príkladom tejto metódy je Laplacián. Poslednou z možností je metóda založená na parametrizácii hrán a v tomto prípade sú detegované hrany s vopred známymi tvarmi [15].

8 NÁVRH A REALIZÁCIA SYSTÉMU

Úvod kapitoly je venovaný špecifikácii riešenej úlohy a popisu skúmaných predmetov. Pri návrhu a realizácii systému sa ďalej rozoberajú zvolené hardvérové súčasti, ich popis a implementácia do výslednej zostavy. V tejto časti je taktiež popísaná komunikácia a užívateľské rozhranie kamery. Posledná sekcia sa zaoberá návrhom, použitím a optimálnym nastavením parametrov softvérových nástrojov pre zadané úlohy.

8.1 Špecifikácia úlohy

Mnoho výrobcov v oblasti potravinárstva, chemického a farmaceutického priemyslu balí svoje výrobky do plastových a laminátových túb. Tie sú následne uzatvorené pomocou zváracích klieští a označené pre potreby ďalšieho výrobného procesu alebo konečného spotrebiteľa. Tuby bývajú značené rôznymi kódmi, vzormi, či textom a značenie prebieha formou tlače alebo vyrazením znakov do materiálu. V niektorých prípadoch môže vplyvom nesprávnej orientácie tuby voči raziacemu zariadeniu alebo poruchou tohto zariadenia dôjsť k tomu, že je tuba označená nedostatočne alebo vôbec, a preto je potrebné tento proces kontrolovať. V priemyselnej praxi sa osvedčila vizuálna kontrola. Je možné ju realizovať pomocou inšpekčných pracovníkov alebo s užitím strojového videnia.

Cieľom zadanej úlohy je navrhnuť, zrealizovať a otestovať systém s použitím prostriedkov a nástrojov strojového videnia. Predmetom skúmania sú plastové tuby, značené embosovaným textom a vzormi. Návrh a realizácia systému pozostáva z popisu zvolených hardvérových prostriedkov a aplikácii softvérových nástrojov v jednotlivých prípadoch navrhnutého riešenia. Následne je systém otestovaný a získané dáta sú štatisticky vyhodnotené.

8.2 Skúmané predmety a hľadané parametre

Aby bolo možné navrhnuť systém strojového videnia, je potrebné popísať sledované objekty a stanoviť hľadané parametre. Za týmto účelom sú navrhnuté nasledovné dve aplikácie, v ktorých je predmetom inšpekcie plastový obal alebo tuba:

- **kontrola dátumu.** V potravinárskom priemysle je potrebné z dôvodu ochrany spotrebiteľa uvádzať, do kedy je možné dané výrobky skonzumovať, a preto musí každý výrobok obsahovať dátum spotreby [12]. Obdobným parametrom je dátum minimálnej trvanlivosti, ktorým sú značené výrobky v chemickom a farmaceutickom priemysle. Cieľom tejto úlohy je navrhnuť a zrealizovať systém, slúžiaci ku kontrole dátumu minimálnej trvanlivosti produktu. Následne

budú výsledky vyhodnotené v niekoľkých variantoch, s uvažovaním rušivých vplyvov prostredia, akými sú napríklad externé svetelné zdroje, denné svetlo alebo rozdielna poloha objektu v zornom poli kamery. Skúmanými predmetmi sú plastové obaly smotany do kávy na obrázku nižšie.



Obr. 24: Vzorky použité v úlohe kontrola dátumu

- **kontrola uzáveru.** Výrobné závody zvyčajne produkujú viacero výrobkov, určených pre rôznych zákazníkov. V niektorých prípadoch môže byť produkt identický, ale klient vyžaduje, aby malo balenie konkrétny dizajn. V závislosti na veľkosti podniku a množstve rôznych balení môže prísť k zámene polotovarov, a tým pádom k zníženiu kvality alebo nesprávnym dodávkam. Zadanie úlohy spočíva z návrhu a realizácie systému strojového videnia, určeného ku kontrole správneho uzáveru na plastových tubách.



Obr. 25: Vzorky použité v úlohe kontrola uzáveru

8.3 Hardvérové súčasti a príslušenstvo

Pre obe zadané úlohy je zvolené identické hardvérové riešenie, avšak vzhľadom na odlišný dizajn a rozmery sledovaných objektov, sú jednotlivé prvky zostavy umiestnené geometricky odlišne. Hardvérové prostriedky k realizácii systému boli poskytnuté spoločnosťou Festo, s.r.o. a navrhnuté riešenie pozostáva z nasledovných prvkov:

- kamerový snímač,
- objektív,
- osvetľovač,
- montážne a elektrické príslušenstvo,
- spracovanie obrazových dát.

Snímanie obrazu je navrhnuté prostredníctvom kamerového snímača FESTO SBSI-Q-R3B-F6-W. Ide o kompaktné zariadenie disponujúce monochromatickým obrazovým snímačom a integrovanou optickou sústavou, ktorá pozostáva z objektívu s fixnou ohniskovou vzdialenosťou a osvetlením odpovedajúcim vlnovej dĺžke bielej farby. Zaostrenie obrazu je regulované prostredníctvom nastavovacej skrutky umiestnenej na zadnej časti kamery. V tomto priestore sa nachádzajú rozhrania pre pripojenie snímača k napájaniu, nadradenému systému, a taktiež pripojeniu vstupno-výstupných periférií. Na základe informácií od výrobcu možno zariadenie charakterizovať ako kompaktný snímač využívajúci prvky inteligentnej kamery. Bližšie technické informácie sú uvedené v tabuľke 2.



Obr. 26: Kamerový snímač FESTO SBSI-Q-R3B-F6-W

Tab. 2: Technické údaje kamerového snímače [13]

Všeobecné technické údaje	
Rozlíšení snímača	736 x 480 pixelov (WideVGA)
Typ snímača	monochromatický
Zaostrenie	nastavovacou skrutkou
Upevnenie objektívu	integrované
Rýchlosť snímania [fps]	50
Ohnisková vzdialenosť [mm]	6
Zobrazovacie pole [mm]	min. 5x4
Pracovná vzdialenosť [mm]	6-nekonečno
Rozmery Š x D x V [mm]	45 x 45 x 76,7
Hmotnosť [g]	160g
Rozhranie, Ethernet	
Ethernet, pripojovacia technika	zásuvka, M12, 4 pin
Ethernet, rýchlosť prenosu dát	100 Mb/s
Ethernet, podporované protokoly	TCP/IP, Ethernet/IP, FTP, SMB, PROFINET
Digitálne vstupy/výstupy a elektrické napájanie	
Elektrické pripojenie	konektor M12, 12 pin
Počet digitálnych vstupov	2
Počet digitálnych výstupov	4
Počet voliteľných digitálnych vstupov / výstupov	2
Spínací vstup	PNP/NPN (možno zmeniť)
Spínacia úroveň [V]	signál 0: ≤ 3
Spínací výstup	PNP/NPN (možno zmeniť)
Max. výstupný prúd [mA]	50
Menovité napájacie napätie [VDC]	24
Prípustné výkyvy napätia [%]	-25 ... +10
Max. prúdový príkon [mA]	550
Príkon pri nezaťažených výstupoch [mA]	200
Prevádzkové podmienky	
Teplota okolia [°C]	0 ... +50
Stupeň krytia	IP67
Odolnosť voči vibráciám	podľa EN 60068-2-6
Odolnosť voči nárazom	podľa FN 942017-5 a EN 60068-2-27, stupeň 2

Vzhľadom na charakter riešených úloh, nie je použitie osvetlenia integrovaného v kamere vhodnou voľbou. Snímaním lesklých objektov, s použitím smerovaného osvetlenia kamery, vznikajú na výslednom obraze nežiadúce odlesky, a tým pádom nie je možné dosiahnuť požadovaný kontrast. Pri návrhu vhodného osvetlenia bolo potrebné

zohľadniť materiál a tvar sledovaných objektov. Záujmovými parametrami sú vyrazené vzory a embosovaný text, takže je potrebné sledovať členitosť skúmaného povrchu. Za účelom potlačenia odleskov a zvýraznenia nerovností povrchu bolo zvolené difúzne osvetlenie typu dark-field v kruhovom prevedení [14] zobrazené na obrázku 27. Dodatočné technické parametre zvoleného osvetľovača sú uvedené v tabuľke nižšie.

Tab. 3: Technické parametre zvoleného osvetľovača [15]

Mechanické parametre					
Materiál telesa	Hliník				
Teplota a vlhkosť okolia [°C, %]	0 - 35, 20 -85				
Hmotnosť [g]	165				
Veľkosť osvetľovača ØxH [mm]	Ø130.0 x 12.0				
Stupeň krytia	IP30				
Optické informácie					
Farba LED	RED(R/R2 40	InfraRed (IR/IR24)	GREEN(G)	BLUE (B)	WHITE (W)
Vlnová dĺžka [nm]	626	850	525	470	xy=(0.31,0.3 2)
Osvetlenie (počet of LED)	100	98	98	98	98
Osvetlená plocha [mm]	Ø94				
Elektrické informácie					
Menovité napájacie napätie [VDC]	24 ± 0,5				
Prípustné výkyvy napätia [%]	± 5				
Ochrana voči prepólovaniu	Áno				
Typické dopredné napätie osvetlenia [V]	22.0				
Max. prúdový príkon [A]	0.40				
Spotreba energie [W]	9.60				
Teplota osvetlenia po 60 minútach v prevádzke [°C]	56				
Stroboskopický režim	R24				
Maximálny impulzný prúd po dobu max. 10 ms [A]	1.00				
Umiestnenie osvetlenia					
Optimálna pracovná vzdialenosť [mm]	0 - 20				

Pri návrhu a realizácii výslednej zostavy bolo potrebné zvoliť vhodné elektrické príslušenstvo a montážne prvky. Kabeláž je ku kamere pripojená prostredníctvom 12-pinového konektora M12 a u osvetľovača 3-pinovým konektorom M8. Následne sú jednotlivé pripojenia zvedené do svorkovnice a pripojené na zdroj jednosmerného napätia

24 V s nominálním proudem 1 A. Osvětlovač je opatřený montážním uholníkom a pripevnený na zhotovenú konštrukciu. Zabezpečenie polohy kamerového snímača je realizované použitím hydraulického držiaku NOGA.



Obr. 27: Osvetľovač Vital Vision V2DR-Si130LA1

8.4 Komunikácia kamery a užívateľské rozhranie

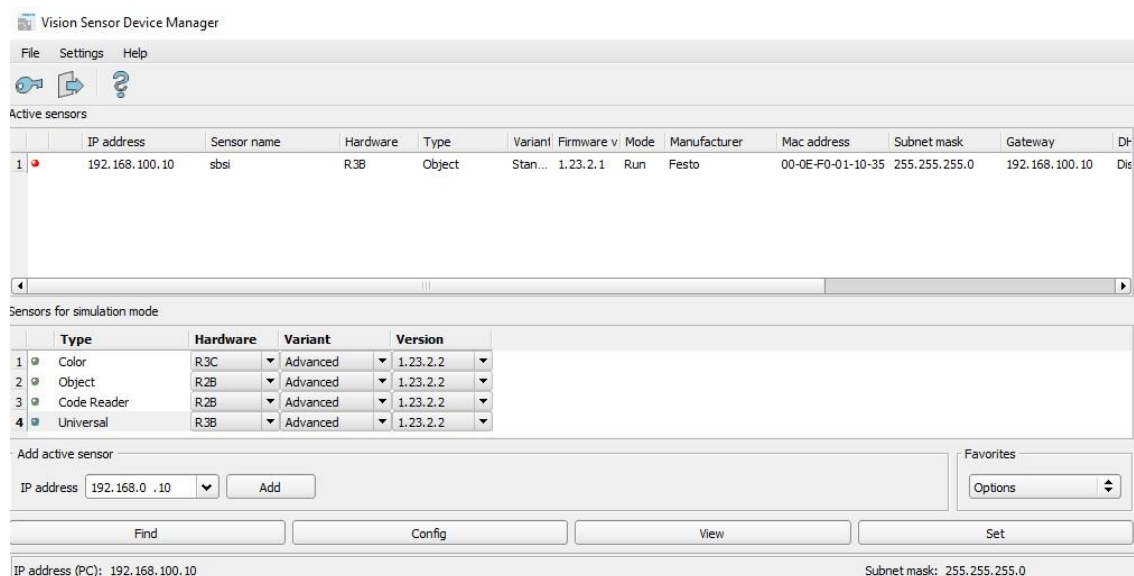
Zvolený kamerový snímač je schopný obrazové dáta spracovávať v zariadení a predávať ich priamo do nadradeného systému alebo vizualizácie, avšak z didaktických dôvodov je snímač pripojený na PC a vyhodnotenie nasnímaného obrazu prebieha v užívateľskom rozhraní kamery. Z tohto dôvodu boli navrhnuté, zrealizované a sprevádzkované nasledujúce dve možnosti pripojenia, využívajúce protokol TCP/IP¹²:

- **Statická adresa IPv4** – spárovanie kamery s PC prebieha nastavením identickej IPv4 adresy, masky podsiete a príslušnej brány na oboch zariadeniach.
- **DHCP Server**¹³ – pripojenie je realizované prostredníctvom voľne dostupného softvéru DHCP configuration wizard. Prvým krokom je nastavenie IPv4 adresy a masky podsiete na PC a následne je zvolený rozsah adries, ktoré je možné pridelit' zariadeniam v sieti. Po fyzickom pripojení kamerového snímača do siete je mu ponúknutá konkrétna adresa, ktorú snímač akceptuje, a tým pádom je

¹² TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) – celosvetový protokol pre komunikáciu v počítačovej sieti Internet.

¹³ DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol) – Protokol používaný pre automatickú konfiguráciu zariadení pripojených do siete.

spojenie medzi kamerou a PC nadviazané. Táto forma komunikácie je vhodná, ak je v aplikácii potrebné použiť viacero kamerových snímačov.



Obr. 28: Vstupné rozhranie FESTO SBS Vision Sensor [16]

Po sprevádzkovaní komunikácie medzi kamerou a PC sú prostredníctvom voľby Config na obrázku 28, v užívateľskom rozhraní kamery nastavené prístupové práva užívateľa. Následne je zvolená funkcia View umožňujúca voľné snímanie obrazu a v tomto režime je nastavená predbežná geometrická orientácia kamery voči sledovanému objektu.

8.5 Kontrola dátumu spotreby

Prvým krokom pri návrhu riešenia pre kontrolu dátumu spotreby, je výber vhodného geometrického umiestnenia kamery a optickej sústavy, ktoré je závislé na materiáli a tvare záujmového objektu. Snímané predmety sú valcovitého tvaru, pričom priemer sledovanej oblasti činí 26 mm a materiál telesa je z lesklého bieleho plastu. Keďže kamera disponuje integrovaným objektívom s pevným ohniskom, jej umiestnenie bolo situované tak, aby bola vo výslednom obraze zobrazená plocha obsahujúca dátum spotreby. Pre danú aplikáciu bola zvolená pracovná vzdialenosť 55 mm, a následne bolo pomocou nastavovacej skrutky na zadnej časti telesa kamery vyladené požadované zaostrenie. Vzhľadom na lesklý povrch skúmaných predmetov je zvolené umiestnenie obrazového snímača pod 15° uhlom voči normále roviny sledovaného objektu [17]. Týmto polohovaním bola dosiahnutá eliminácia nežiadúcich odleskov a zvýraznenie členitosti povrchu.



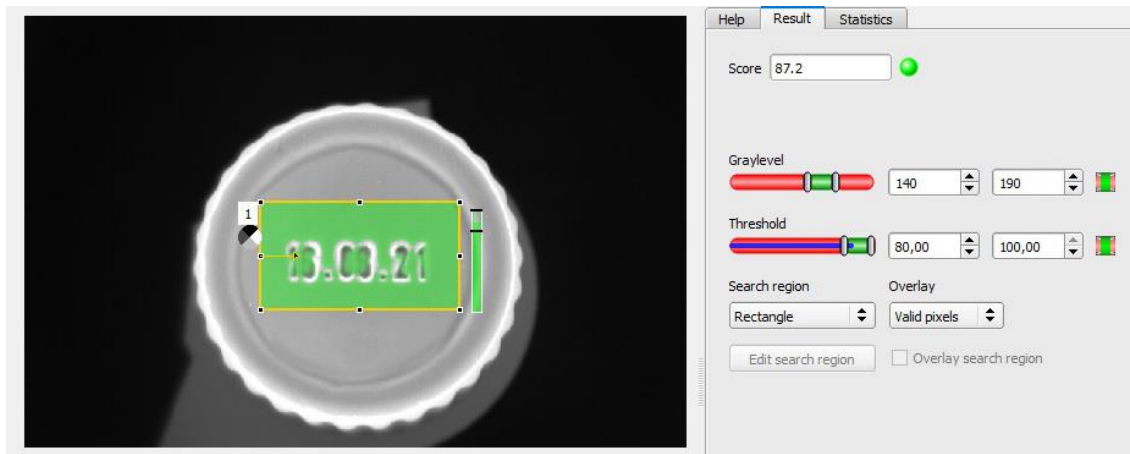
Obr. 29: Realizovaný systém strojového videnia

Následne bola pre účel tejto úlohy navrhnutá a zrealizovaná konštrukcia na obrázku 29, pomocou ktorej je osvetľovač umiestnený rovnobežne voči rovine podložky. Pri návrhu pracovnej vzdialenosti osvetľovača boli zohľadnené doporučená výrobcu [15] a výška sledovaného objektu, ktorá činí 23 mm. S uvažovaním predošlých parametrov bol osvetľovač umiestnený vo výške 30 mm od podložky a teda 7 mm nad objektom tak, aby boli optimálne zvýraznené kontúry dátumu spotreby.

Pre danú úlohu je navrhnuté riešenie s využitím detektora kontrastu a OCR, pričom výstupom merania je jasová úroveň vo zvolenej oblasti a nasnímaný znakový reťazec.

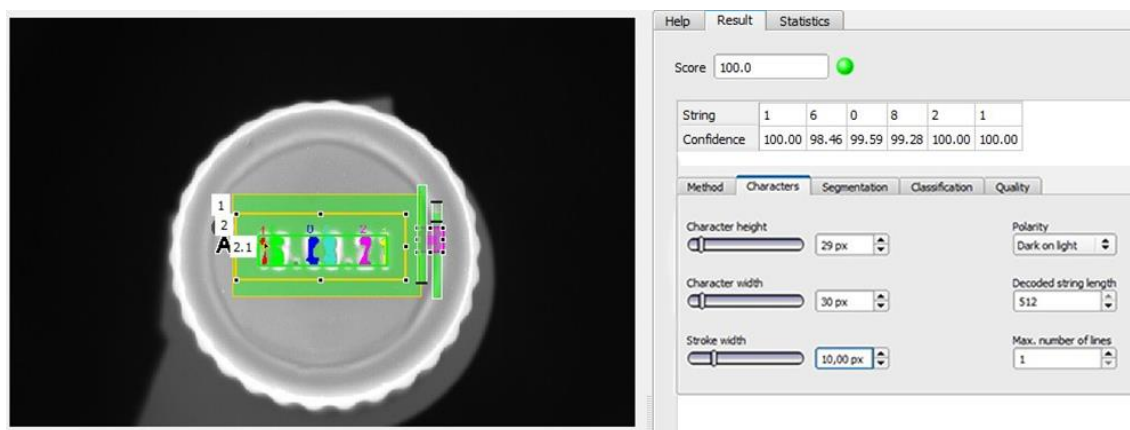
Ako prvá je vyhodnotená jasová úroveň vo zvolenej oblasti. Dôvodom implementácie tohto detektora je zabezpečenie stálych okolitých podmienok. Zmena kontrastu v záujmovej oblasti výrazne ovplyvňuje vyhodnocovacie schopnosti kamerového snímača, a taktiež môže signalizovať závalu na osvetľovacej sústave. Uživatelské rozhranie umožňuje u tohto detektora nastavenie rozsahu požadovanej hodnoty sivej a prahových hodnôt kontrastu. V zadanej úlohe bola zvolená obdĺžniková zóna, vymedzujúca plochu s výskytom vyrazeného dátumu. Následne bol určený akceptovateľný rozsah požadovanej hodnoty sivej, ktorý sa pre túto úlohu pohybuje v rozmedzí 140 až 190 jasových úrovní a rozsah detektoru je nastaviteľný od 0 po 255 hodnôt. Výstupným parametrom tohto detektora je skóre, ktoré je závislé na nastavených prahových hodnotách. Pre kontrolu dátumu na plastových obaloch bola zvolená spodná

tolerančná hranica 80% a v prípade poklesu kontrastu pod túto hodnotu detektor automaticky vyhodnocuje meranie za neúspešné. Na obrázku 30 je zobrazené nastavenie jednotlivých parametrov detektora na vybranú záujmovú zónu.



Obr. 30: Implementácia detektora kontrastu

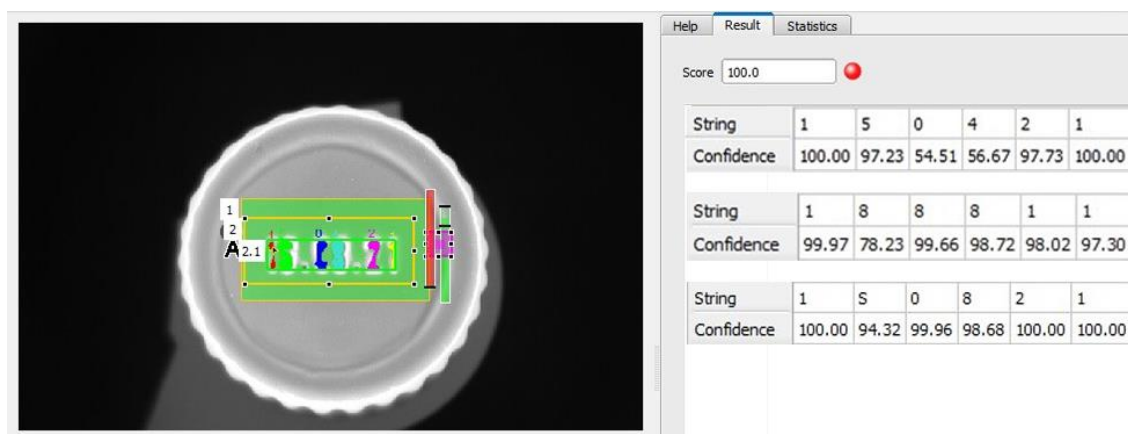
Pre detektor OCR bolo potrebné nastaviť väčšie množstvo parametrov a vzhľadom na to, že snímané znaky sú veľké 3x1 mm, bolo taktiež nutné zmenšiť záujmovú oblasť, čím bola dosiahnutá lepšia presnosť čítania znakov. Sledované objekty sú bielej farby a zvolená geometria osvetlenia zvyrazňuje na členitých miestach povrchu tmavé hodnoty sivej. Z tohto dôvodu bolo zvolené snímanie tmavých znakov na svetlom povrchu.



Obr. 31: Nastavené parametre pre detektor OCR

V ďalšom kroku bola nastavená výška, šírka a rozmer medzi jednotlivými znakmi sledovaného reťazca, ako vidieť na obrázku 31. Znaky sú pri tomto detektore vyhodnocované s určitou mierou presnosti. S tým súvisí nastavenie tolerančnej hranice, podobne ako tomu bolo u detektora kontrastu. V tomto prípade je spodná tolerančná hranica nastavená na hodnotu 95%. Všetky vyššie spomenuté parametre určitým

spôsobom ovplyvňujú získaný výstup, avšak najvýznamnejší podiel na výslednej informácii má vhodný výber znakovkej sady. Rozhranie pre spracovanie obrazu poskytuje použitie viacerých znakových knižníc. Za účelom optimalizácie navrhnutého procesu bolo zvolené vyhodnotenie identického snímku, s použitím znakových sád Pharma, Industrial_0-9, OCRA_0-9 a Pharma_0-9. Znaková knižnica vykazujúca najlepšiu mieru správnosti nasnímaných informácií je následne zvolená ako posledný parameter k vyhodnoteniu úlohy.

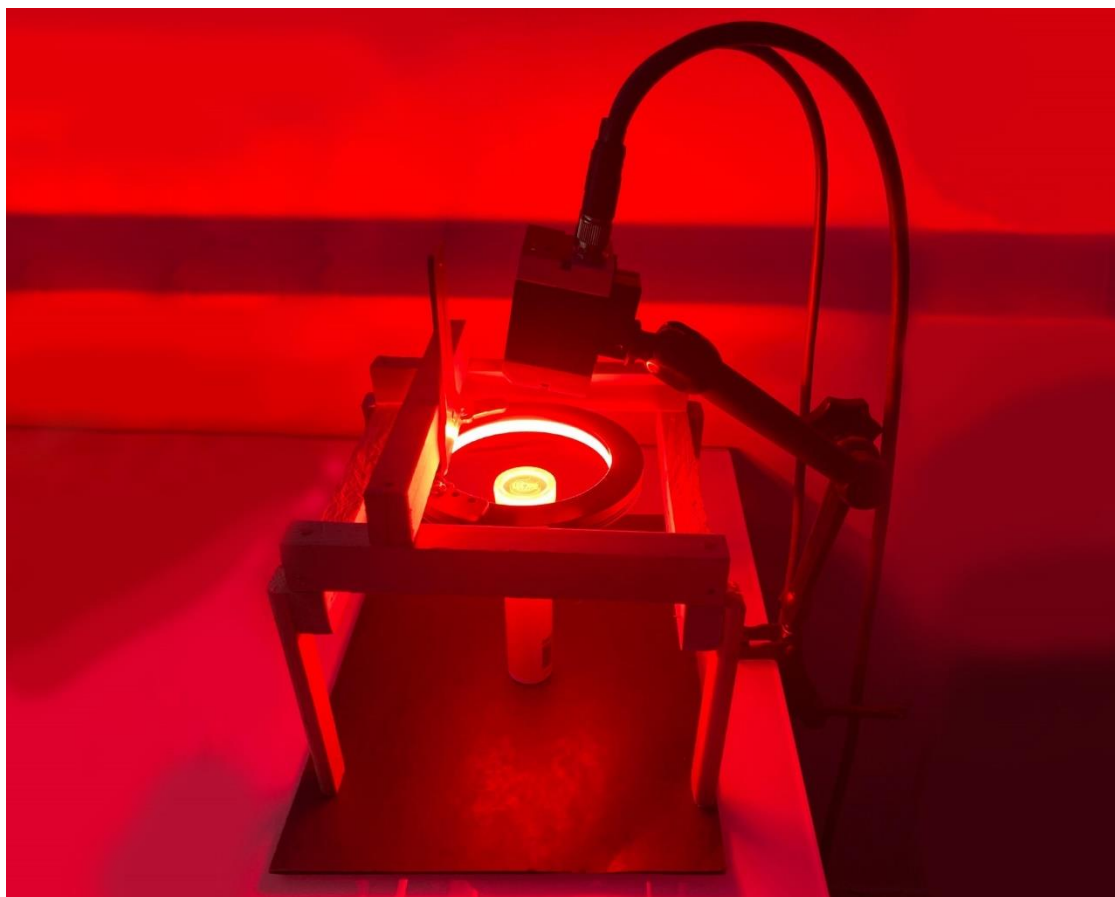


Obr. 32: Výsledky merania pre znakové sady Industrial_0-9, OCRA_0-9 a Pharma

Požadovaným výstupom je znakový reťazec 160821 a obrázok 32 poskytuje výsledky merania s použitím znakových sád Industrial_0-9, OCRA_0-9 a Pharma. Výstupom knižnice Industrial_0-9 je reťazec 150421, čo odpovedá 50% percentnej zhode so snímaným vzorom. Avšak presnosť vyhodnotenia znakov 04 v reťazci sa pohybuje na úrovni 55%, a keďže nebola splnená spodná kvalitatívna hranica 95%, font nebude zvolený pre vyhodnotenie výsledkov. Znaková sada OCRA_0-9 takmer splnila požiadavku na kvalitu znakov, ale získaný reťazec bol so vzorom zhodný iba v jednom znaku, a tým je táto knižnica vylúčená pre ďalšie použitie. Ďalším zvoleným fontom je PHARMA, ktorý vykazuje zhodu 5 zo 6 znakov a spĺňa aj kvalitatívne požiadavky procesu. Vzhľadom na to, že táto sada disponuje pomerne solídnym výstupom a spĺňa kvalitatívne požiadavky úlohy, bola zvolená k ďalšiemu skúmaniu knižnica PHARMA_0-9, obmedzujúca rozpoznávanie znakov iba na číselné hodnoty. S použitím posledného zvoleného fontu bola dosiahnutá úplná zhoda s vyrazeným vzorom, a taktiež zvolené kvalitatívne požiadavky, ako vidieť na obrázku 31. Z tohoto dôvodu bude úloha vyhodnotená s využitím fontu PHARMA_0-9, s nastavením vyššie popísaných parametrov.

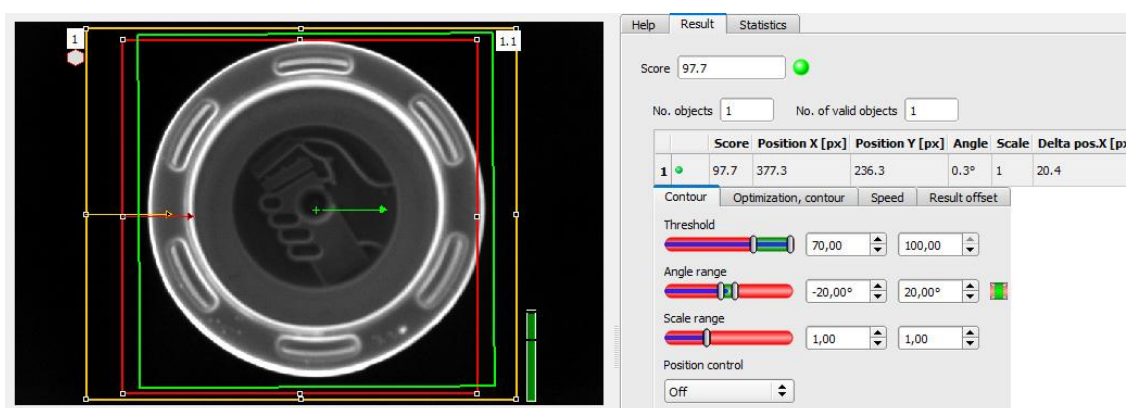
8.6 Kontrola uzáveru

Podobne ako v predošlej úlohe, je ako prvá zvolená vhodná geometria jednotlivých súčastí systému, ktorá sa odvíja od tvaru sledovaných objektov. Použité vzorky sú tuby valcovitého tvaru s výškou 144 mm a priemer sledovanej plochy činí 33 mm. Vzhľadom na to, že kamerový snímač disponuje zabudovaným objektívom s pevným ohniskom, k riešeniu úlohy bola navrhnutá pracovná vzdialenosť 55 mm a umiestnenie snímača je orientované pod 15° uhlom voči normále roviny sledovaného objektu [15]. Taktiež bolo príslušne nastavené zaostrenie kamery, za účelom zvýraznenia kontúry uzáveru. Nastavenie vhodnej geometrie osvetľovača vyžadovalo výškovú úpravu konštrukcie, na ktorej je upevnený a vzhľadom na to, že je v tejto úlohe potrebné zvýrazniť kontúru objektu, bol osvetľovač situovaný rovnobežne s podložkou vo vzdialenosti 1 mm nad snímanou tubou, ako vidieť na obrázku nižšie.



Obr. 33: Zostava pre kontrolu uzáveru

Pre kontrolu uzáveru bolo navrhnuté riešenie s využitím detektora kontúry objektu a maskovaním určitej časti snímku. Dôvodom implementácie masky bola snaha eliminovať pozitívne vyhodnocovanie negatívnych vzoriek, keďže všetky testované vzorky disponujú identickým vzorom vyrazeným na uzávere.



Obr. 34: Nastavenie parametrov pre vyhodnotenie kontúry

Predtým, ako sa pristúpilo k nastaveniu jednotlivých parametrov detektora, bolo potrebné nasnímať použitú vzorku, u ktorej prebehlo vyhodnotenie kontúry a tento vzor bol následne použitý ako referenčný. Výstupom zvoleného detektora sú súradnice stredu nasnímaného obrazu, uhol natočenia voči referenčnému vzoru a celkové skóre odvíjajúce sa od zvolených parametrov. V ďalšom kroku bola vymedzená záujmová zóna, ktorá je na obrázku 34 značená žltým orámovaním a v tejto oblasti bude detektor očakávať prítomnosť sledovaných objektov. Vzhľadom na to, že očakávaným výstupom z tejto úlohy je schopnosť detegovať správne a nesprávne uzávery, bola zvolená spodná prahová hodnota skóre 70%, čo znamená že kontúra snímaného objektu musí byť aspoň zo 70% podobná s referenčným vzorom. Úloha nemá merací charakter a na to, aby bol zachytený negatívny výsledok je toto nastavenie postačujúce. Ďalším parametrom je vymedzenie povoleného uhlu natočenia, ktoré bolo zvolené v rozsahu -20 až 20° a keďže sú vzory na uzávere rozmiestnené rovnomerne, objekty je možné týmto nastavením vyhodnocovať nezávisle od ich orientácie. Pre mierku nebola zvolená žiadna tolerancia, keďže je vzdialenosť kamery od objektu presne stanovená. Na obrázku 34 je vidieť, že užívateľské rozhranie umožňuje aj kontrolu polohy, ale vzhľadom na to, že tieto parametre nie sú v danej úlohe vyhodnocované, nebola táto funkcia implementovaná. Ako posledná bola stanovená minimálna hodnota kontrastu, kedy je ešte detektor schopný vyhodnotiť hranu objektu ako spojitú. Tento parameter bol nastavený experimentálne tak, aby boli detegované vzory na uzávere a výsledok nastavení možno vidieť na obrázku 35.

Vzhľadom na to, že dobré aj zlé vzorky, pomocou ktorých bude systém následne otestovaný disponujú identickým vzorom na uzávere, bola navrhnutá implementácia maskovania. Žltá časť sledovaného snímku na obrázku 35 vymedzuje maskovanú oblasť, v ktorej neprebíha sledovanie kontúry objektu, a tým je zvýšená pravdepodobnosť že negatívna vzorka nebude vyhodnotená pozitívne.



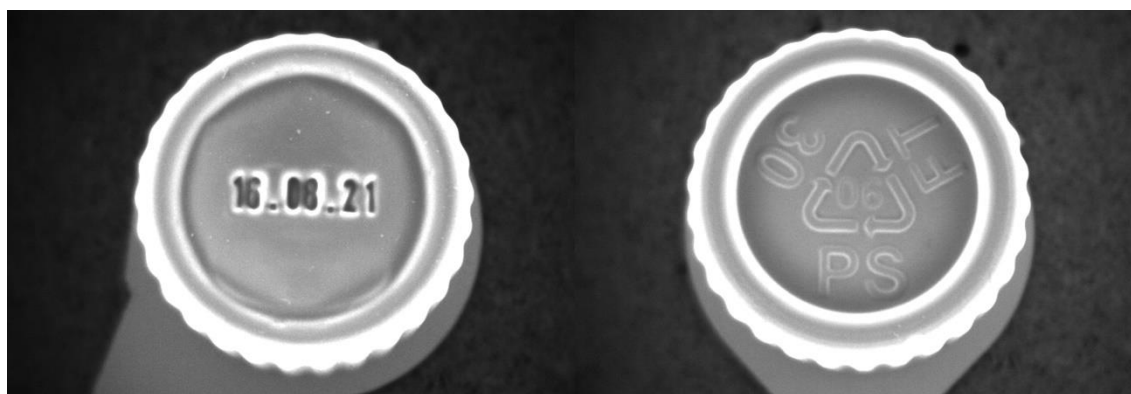
Obr. 35: Referenčná kontúra objektu a aplikované maskovanie.

9 OTESTOVANIE SYSTÉMU

Pri voľbe geometrie pre jednotlivé prvky systému a nastavovaní parametrov pre detektory sa postupovalo tak, aby boli dosiahnuté čo najlepšie výsledky merania. Optimalizácia však prebiehala na minimálnom množstve vzoriek, a vzhľadom na to, že riešenie je určené na repetitívne vyhodnocovanie informácií, je potrebné systém otestovať na väčšom množstve vzoriek, a tým zhodnotiť funkčnosť zrealizovaného systému.

9.1 Rozpoznávanie znakov

K vyhodnoteniu úlohy bola zvolená sada vzoriek na obrázku 36, ktorá pozostáva z 30 kusov plastových obalov obsahujúcich embosovaný znakový reťazec a 40 kusov vzoriek s vyrazenými značkami. Obaly s dátumom spotreby sú považované za vzorky pozitívne a na každom kuse je vyhodnocovaný reťazec o dĺžke 6 znakov. Zvyšné by mal systém vyhodnotiť ako negatívne. Súčasťou testovacej sady sú aj závadné kusy obsahujúce preliačiny. Dôvodom ich implementácie je zhodnotenie reakcie detektora sivej na zmenu svetelných podmienok na objekte. Pri snímaní boli jednotlivé objekty náhodne vyberané a pre každé meranie boli zaznamenané príslušné hodnoty použitých detektorov. Testovanie systému prebiehalo za prítomnosti denného svetla a zostava komponentov bola umiestnená vo vzdialenosti 1 metra od okna.



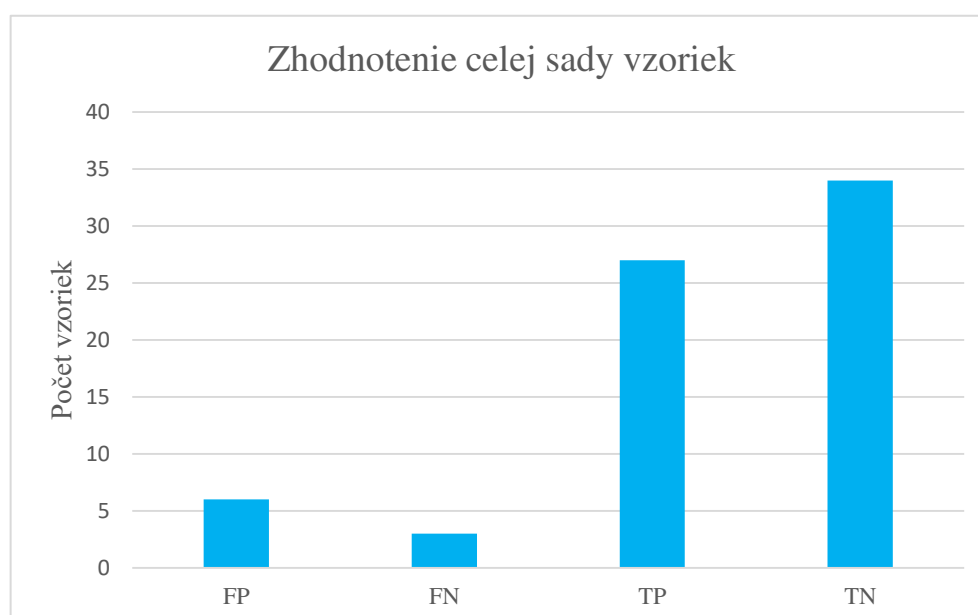
Obr. 36: Vľavo pozitívna vzorka s embosovaným znakovým reťazcom, vpravo negatívna

Ako prvá bola vyhodnotená úspešnosť, s akou je navrhnuté riešenie schopné rozpoznávať znaky na pozitívnych vzorkách. Spoločne sa hodnotilo 30 snímok, na ktoré bol aplikovaný detektor OCR v navrhnutej konfigurácii a sledovaným parametrom bolo množstvo správne prečítaných znakov. Vzhľadom na to, že embosovaný reťazec má dĺžku 6 znakov a zhodnotených bolo 30 meraní, mohlo byť celkovo odhalených 180 znakov. Z hľadiska absolútneho počtu znakov, systém úspešne vyhodnotil 133, čo predstavuje úspešnosť 73,8%. Zvyšných 47 znakov systém nedetegoval alebo ich vyhodnotil nesprávne.



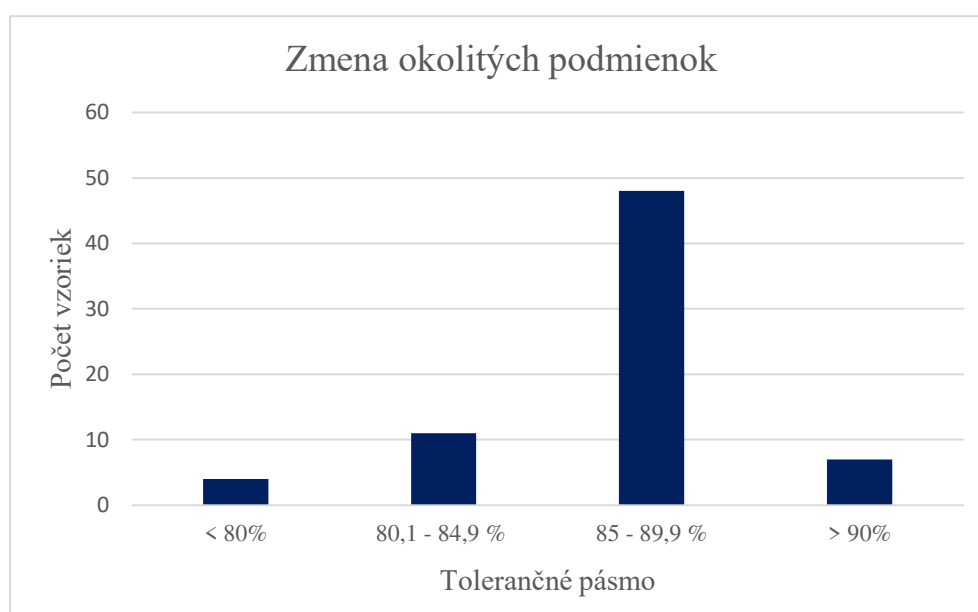
Obr. 37: Úspešnosť rozpoznávania znakov u jednotlivých vzoriek

Následne bolo hodnotené množstvo správne rozpoznaných znakov u jednotlivých objektov. Grafické znázornenie na obrázku 37 poskytuje predstavu o nameraných výsledkoch, pričom pri každej pozitívnej vzorke detektor správne rozpoznal aspoň dva znaky a v tomto jednom konkrétnom prípade išlo o závadnú vzorku. Pri dvoch meraniach bola zaznamenaná úspešnosť 50% a vo zvyšku objektov bolo rozpoznaných štyri alebo viac znakov, čo odpovedá 90% množstvu všetkých pozitívnych vzoriek. V polovici prípadov bolo správne rozpoznaných päť znakov a druhým najčastejším výsledkom boli štyri znaky. Úspešne vyhodnotiť celý reťazec sa podarilo pri štyroch objektoch.



Obr. 38: Zhodnotenie výsledkov pre kompletnú sadu vzoriek

Ďalej prebehlo vyhodnotenie výsledkov merania pre kompletnú sadu objektov a jednotlivé výstupy boli rozdelené do štyroch kategórií. Prvú skupinu tvoria negatívne vzorky, pri ktorých detektor rozpoznal znaky a na obrázku 38 sú označené ako FP, teda falošne pozitívne. Do kategórie falošne negatívnych, označenej na grafe vyššie FN, boli zaradené všetky predmety, pri ktorých sa podarilo rozpoznať tri alebo menej znakov. S týmto výsledkom boli vyhodnotené celkom tri merania. Skupina TP zahŕňa všetky prípady, kedy došlo k správnej detekcii štyroch alebo viacerých znakov na pozitívnych vzorkách a tento výstup bol zaznamenaný celkovo pri 27 prípadoch. Posledný prípad označený TN vyjadruje množstvo negatívnych vzoriek, ktoré boli vyhodnotené správne.

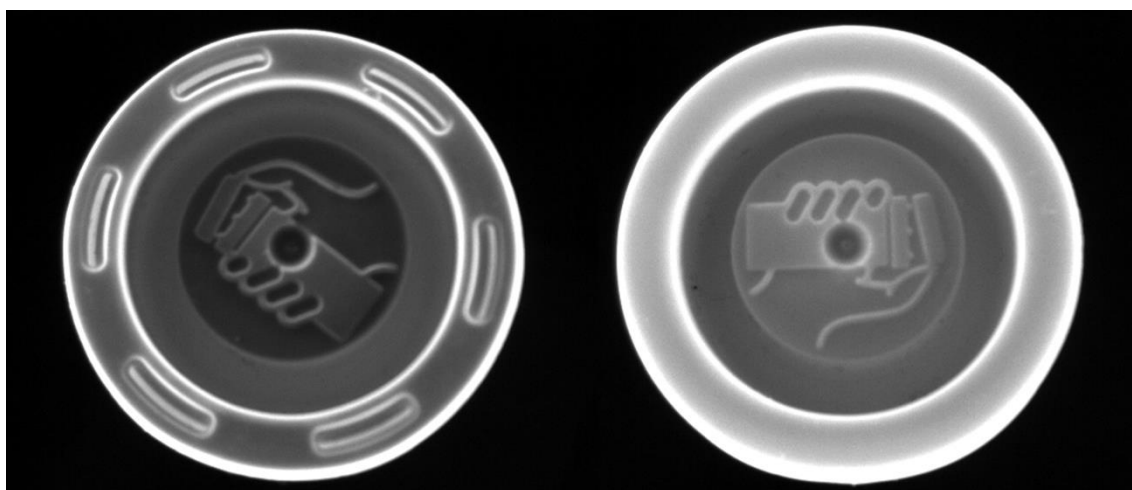


Obr. 39: Rozdelenie meraní podľa výstupu z detektoru sivej

Grafické znázornenie na obrázku 39 vyjadruje množstvo vzoriek pripadajúcich do zvolených úrovní detektora sivej, ktoré boli určené na základe nastavených parametrov. Spodná prahová hodnota, kedy by mal detektor upozorniť na zmenu svetelných podmienok, ktoré môžu predstavovať preliačiny na výrobkoch, bola určená na hranici 80% v medzi jasových úrovní, stanovených pri návrhu systému. Spoločne boli zaznamenané štyri takéto prípady, a vzhľadom na to, že v celej sade bolo celkovo 6 závadných vzoriek, bola detekcia úspešná na 66,6%. Pri dvoch neodhalených výrobkoch boli zaznamenané hodnoty skóre 80,1% a 81,7%, čo znamená že ak by bola spodná hranica nastavená aspoň na 82%, systém by bol schopný odhaliť všetky závadné výrobky v sade. Zvyšných 66 meraní bolo vyhodnotených ako vyhovujúce v rámci stanovenej tolerancie a najpočetnejšiu skupinu tvorili vzorky, pri ktorých sa pohybovali hodnoty skóre na úrovni 85 až 89,9%. Celkovo takýto výsledok pripadal na 48 meraní. V rozsahu 80,1 až 84,9% sa umiestnilo 11 výrobkov a na zvyšných siedmich bola nameraná hodnota skóre nad úrovňou 90%.

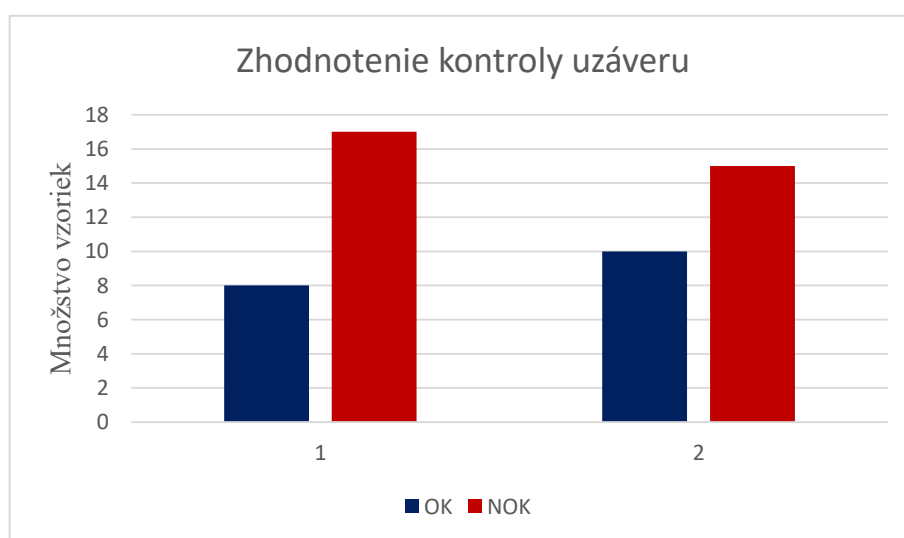
9.2 Kontrola uzáveru

Meranie prebiehalo na sade vzoriek zobrazených na obrázku 40, v celkovom počte 25 kusov. Jednotlivé výrobky boli hodnotené ako vyhovujúce, alebo naopak nevyhovujúce. Sada pozostávala z 10 túb so správnym uzáverom, pri ktorých sa očakával pozitívny výsledok a zvyšných 15 výrobkov predstavovalo negatívne vzorky. Snímané výrobky boli v priebehu merania náhodne vyberané a orientácia uzáveru nebola kontrolovaná.



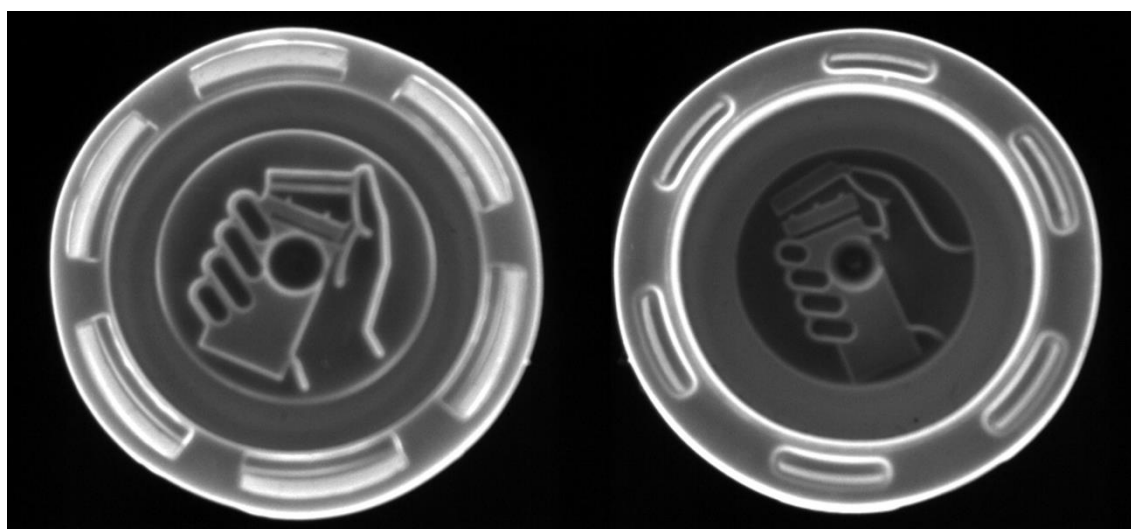
Obr. 40: Na obrázku vľavo pozitívna vzorka a vľavo negatívna

Navrhnuté riešenie poskytovalo bezchybné vyhodnotenie sledovaných parametrov, čo sa ukázalo už pri zhodnotení prvého merania. Výsledok s kladným hodnotením bol zaznamenaný v ôsmich prípadoch a na zvyšných 17 výrobkov pripadal



Obr. 41: Zhodnotenie výsledkov pri kontrole uzáveru

negativný výsledok. Vzhľadom na to, že pre potreby otestovania systému bolo zabezpečených 10 správnych výrobkov, bolo potrebné pristúpiť k analýze jednotlivých snímok, pri ktorých sa očakával pozitívny výstup. Bližším skúmaním bolo zistené, že pri zabezpečovaní správnych vzoriek došlo k chybnému výberu. Spomínané dva výrobky, zobrazené na obrázku 42 vľavo, majú na uzáveroch vyrazené iné znaky ako referenčná vzorka na obrázku vpravo, ktorá bola použitá pri návrhu riešenia.



Obr. 42: Porovnanie závadnej a referenčnej vzorky

Na základe tohto zistenia boli zaistené dodatočne dve vzorky, aby mohla byť funkcia systému pre kontrolu uzáveru riadne vyhodnotená. Pred zabezpečením snímok pre druhé meranie, boli do sady pridané dva správne výrobky a odstránili sa dve negatívne vzorky z pôvodnej sady. Dve tuby, ktoré boli v predošlom meraní odhalené ako nesprávne, boli znovu zaradené do vyhodnotenia s tým rozdielom, že v tomto prípade sa očakával negatívny výsledok. Následne boli všetky tuby premiešané a náhodne vyberané, podobne ako pri získavaní dát počas prvého merania. Výsledky prezentuje opäť graf na obrázku 41, pričom navrhnuté riešenie bolo schopné dokonale rozoznať všetky výrobky so správnym aj nesprávnym uzáverom, vrátane dvoch vyššie spomenutých túb.

ZÁVER

Cieľom bakalárskej práce bolo navrhnuť, zrealizovať a otestovať systém strojového videnia, slúžiaci ku kontrole kvality embosovaného textu a vzorov na plastových tubách. Za účelom nadobudnutia potrebných poznatkov bola ako prvá vykonaná analýza súčasného stavu poznania, ktorá popisuje vznik digitálneho obrazu, jeho spracovanie a strojové vyhodnotenie. Sekcia sa taktiež zaoberá vlastnosťami a technológiou obrazových snímačov, osvetľovačov, objektívov a ich použitím v priemyselnom prostredí.

Predtým, ako sa pristúpilo k samotnému návrhu systému strojového videnia, bolo potrebné vyšpecifikovať riešené úlohy, popísať skúmané predmety a stanoviť hľadané parametre. Za týmto účelom boli navrhnuté dve úlohy, pričom v prvom prípade boli predmetom záujmu embosované dátumy spotreby na plastových tubách. Účelom druhej úlohy bolo stanoviť vhodné riešenie pre kontrolu správneho uzáveru na plastovej tube a sledovaným parametrom boli vyrazené vzory.

Návrh systému prebiehal súbežne s jeho realizáciou a táto časť práce popisuje a odôvodňuje použitie zvolených technických a programových prostriedkov navrhnutého riešenia. Začiatok sekcie sa zaoberá hardvérovými súčastami. Ako prvé bolo potrebné nadviazať komunikáciu medzi kamerovým snímačom a rozhraním pre vyhodnocovanie obrazových dát umiestneným na PC. Vzhľadom na to, že rozhranie kamery podporuje protokol TCP/IP, bola navrhnutá a úspešne zrealizovaná komunikácia prostredníctvom statickej adresy IPv4, a taktiež s využitím DHCP serveru. Následne bola zvolená optická sústava a predbežné geometrické rozmiestnenie jednotlivých súčastí zostavy, ktoré bolo pri návrhu riešení pre jednotlivé úlohy príslušne prispôbené. Softvérová stránka návrhu pozostáva z voľby algoritmov a nastaveniu ich parametrov. Pre zaznamenanie dátumu spotreby bolo navrhnuté riešenie s využitím detektora pre automatické rozpoznávanie znakov a do úlohy bol z dôvodu monitorovania zmien okolitého prostredia taktiež implementovaný algoritmus pre detekciu jasových úrovní v záujmovej oblasti. Kontrola správnosti uzáveru bola navrhnutá s využitím detektora kontúry objektu a do úlohy bolo zahrnuté použitie maskovania, čím bola zvýšená pravdepodobnosť správneho výsledku.

Realizovaný systém strojového videnia bol otestovaný na sade vzoriek, pričom výsledky vykazovali úspešnosť čítania znakov na úrovni 75% a pri kontrole uzáveru boli odhalené všetky výrobky považované za negatívne.

Vzhľadom na to, že strojové videnie je rýchlo vyvíjajúci sa technický smer, a informácie, ktoré poskytujú súčasné zdroje v slovenskom a českom jazyku sú obmedzené, prínosom tejto práce je stručný prehľad aktuálnych trendov v oblasti strojového videnia, a taktiež praktická ukážka toho, ako je možné takýto systém navrhnuť, zrealizovať a prevádzkovať.

ZOZNAM POUŽITÉJ LITERATURY

- [1] C. M. Ing. Otto Havle, „Strojové vidění I: Principy a charakteristiky,“ *AUTOMA*, p. 42, 2008.
- [2] A. Hornberg, *Handbook of Machine and Computer Vision*, Berlin: Wiley-VCH, 2017.
- [3] N. Bauer, *Leitfaden zur Industriellen Bildverarbeitung*, Erlangen: Fraunhofer Allianz Vision, 2001.
- [4] COGNEX, „Cognex Releases Deep Learning-Based Image Analysis Software Worldwide,“ *Press Releases*, p. 1, 04 06 2018.
- [5] C. Doc. RNDr. Ing. Rudolf Novák, C. Doc. RNDr. Rudolfa Králová, C. Doc. Ing. Danuše Nováká a D. Doc. RNDr. Bruno Sopko, *Fyzika II*, Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997.
- [6] Control Engineering, „Co je to strojové vidění a jak může pomoci?,“ *Control Engineering Česko*, 1. vyd. Březen/ Duben, pp. 28-30, 2019.
- [7] J. Nakamura, *Image Sensors and Signal Processing for Digital Still Cameras*, Boca Raton: CRC Press, 2006.
- [8] D. Durini, *High Performance Silicon Imaging: Fundamentals and Applications of CMOS and CCD Sensors*, Cambridge: Woodhead Publishing Limited., 2014.
- [9] D. Litwiller, „CMOS vs. CCD,“ *Photonics spectra*, 1. vyd. 8, 2005.
- [10] C. M. Ing. Otto Havle, „Strojové vidění III: Kamery a jejich součásti,“ *AUTOMA*, pp. 42-44, 2008.
- [11] ATEsystem, „atesystem.cz,“ ATEsystem, [Online]. Available: <https://eshop.atesystem.cz/clanek/187/dil-1-radkove-kamery--typy-a-technologie>. [Cit. 7 4 2021].
- [12] R. Štourač, „Jaké objektivy vybrat pro strojové vidění a proč,“ *MM Průmyslové spektrum.*, 1. vyd. 7, 8, 2017.

- [13] C. M. Ing. Otto Havle, „Strojové vidění IV: Osvětlovače,“ *AUTOMA*, 2008.
- [14] V. H. R. B. Milan Sonka, *Image Processing, Analysis, and Machine Vision*, Stamford: Cengage Learning, 2013.
- [15] Festo SE & Co. KG, „SBS Vision Sensor Manual,“ Festo SE & Co. KG, Esslingen, 2014.
- [16] E. F. S. Authority, „Guidance on date marking and related food information: part 1 (date marking),“ 2020.
- [17] FESTO, s.r.o., „www.festo.cz,“ Máj 2017. [Online]. Available: https://www.festo.com/cat/en-gb_gb/data/doc_CS/PDF/CZ/SBSI_CZ.PDF. [Cit. Máj 2021].
- [18] CCS Inc., *Lighting Solution - General Catalog*, Kyoto: CCS Inc., 2013.
- [19] Vital Vision Technology Pte Ltd, „<https://vitalvisiontechnology.com/>,“ [Online]. Available: <https://vitalvisiontechnology.com/low-angle-ring-light-v2dr-si130la1/?fbclid=IwAR2lQIFTyCH3aCPMP5NffI-mZGwJWdiepMrj1k44YtrxnSdQMRdvCGLjdqU>. [Cit. Máj 2021].
- [20] Festo AG & Co. KG, *Software Festo SBS Vision Sensor*, 2018.

ZOZNAM OBRÁZKOV A TABULIEK

Zoznam obrázkov

Obr. 1: Příklady úloh strojového videnia [4]

Obr. 2: Dierková komora nazývaná tiež Camera obscura

Obr. 3: Grafické znázornenie hodnoty signálu $f(t)$ v závislosti na čase t . V ľavej časti obrázku je proces vzorkovania a v pravej - kvantovanie spojitého signálu.

Obr. 4: Stupnica sivej, na obrázku vľavo v spojitnej podobe. Vpravo diskretná stupnica sivej, s použitím 3-bitového prevodníku.

Obr. 5: Projekcia scény na snímač v spojitnej a diskretnnej podobe

Obr. 6: Bayerova maska

Obr. 7: Prierez kamerovým snímačom s použitím Bayerovej masky

Obr. 8: Pohyb náboja v CCD snímači

Obr. 9: Schéma činnosti CCD snímača

Obr. 10: Schéma pasívneho CMOS snímača

Obr. 11: Schéma aktívneho CMOS snímača

Obr. 12: Deformácia obrazu pri snímaní formou postupnej uzávierky

Obr. 13: Porovnanie objektívov C - mount a CS – mount

Obr. 14: Snímanie plošným a riadkovým snímačom

Obr. 15: Odraz a lom dopadajúceho svetla na rozhraní dvoch médií

Obr. 16: Disperzia dopadajúceho svetla na prizmu

Obr. 17: Základné typy šošoviek používané v objektívoch

Obr. 18: Zobrazenie scény pomocou endocentrického a telecentrického objektívu

Obr. 19: Objektív s pevným ohniskom BASLER C11-1620-12M-P a telecentrický objektív OPTO ENGINEERING TC1MHR016-C

Obr. 20: Geometria osvetlenia objektu

Obr. 21: Schéma umiestnenia osvetľovačov: a) Dark-field, b) Osvetľovacie pole, c) Prstencové

Obr. 22: Schéma umiestnenia osvetľovačov: d) Kupolové, e) Koaxiálne, f) Back-light

Obr. 23: Na obrázku vľavo je konektor USB Type A, nasleduje USB Type B a vpravo RJ-45

Obr. 24: Vzorky použité v úlohe kontrola dátumu

Obr. 25: Vzorky použité v úlohe kontrola uzáveru

Obr. 26: Kamerový snímač FESTO SBSI-Q-R3B-F6-W

Obr. 27: Osvetľovač Vital Vision V2DR-Si130LA1

Obr. 28: Vstupné rozhranie FESTO SBS Vision Sensor [16]

Obr. 29: Realizovaný systém strojového videnia

Obr. 30: Implementácia detektora kontrastu

Obr. 31: Nastavené parametre pre detektor OCR

Obr. 32: Výsledky merania pre znakové sady Industrial_0-9, OCRA_0-9 a Pharma

Obr. 33: Zostava pre kontrolu uzáveru

Obr. 34: Nastavenie parametrov pre vyhodnotenie kontúry

Obr. 35: Referenčná kontúra objektu a aplikované maskovanie.

Obr. 36: Vľavo pozitívna vzorka s embosovaným znakovým reťazcom, vpravo negatívna

Obr. 37: Úspešnosť rozpoznávania znakov u jednotlivých vzoriek

Obr. 38: Zhodnotenie výsledkov pre kompletnú sadu vzoriek

Obr. 39: Rozdelenie meraní podľa výstupu z detektoru sivej

Obr. 40: Na obrázku vľavo pozitívna vzorka a vľavo negatívna

Obr. 41: Zhodnotenie výsledkov pri kontrole uzáveru

Obr. 42: Porovnanie závadnej a referenčnej vzorky

Zoznam tabuliek

Tab. 1: Verzie zbernice USB a ich špecifikácia.

Tab. 2: Technické údaje kamerového snímača [13]

Tab. 3: Technické parametre zvoleného osvetľovača [15]

ZOZNAM PRÍLOH

Príloha A – Vyhodnotenie.xls